

移动机会网络组播路由的研究进展

邓 霞¹ 常 乐² 梁俊斌³ 蒋 婵⁴

(广州大学计算机科学与教育软件学院 广州 510006)¹ (广东工业大学自动化学院 广州 510006)²
(广西大学计算机与电子信息学院 南宁 530004)³ (华南理工大学电子与信息学院 广州 510641)⁴

摘 要 在移动机会网络中,节点进行机会式的连接通信,该方式被广泛应用于移动社交网络、车载智能网络、移动自组网络等场景中。移动机会网络群组通信在抢险救灾、社区消息分发及智能交通等领域具有极高的应用价值,组播路由技术是其关键技术之一。将移动机会网络组播路由分为传统组播路由和智能组播路由两类,重点介绍了智能组播路由的研究现状,并采用通用的性能指标对各组播路由策略进行了比较分析。分析结论为:智能组播路由由于考虑了移动机会网络的社会特性、节点缓存、能量及安全等特性,因此具有较好的综合性能。最后展望了组播路由在大数据缓存管理、群组安全策略、车载自组网及动态感知方面的研究前景。

关键词 移动机会网络,组播路由,传统组播路由,智能组播路由

中图分类号 TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.06.003

Survey on Multicast Routing in Mobile Opportunistic Networks

DENG Xia¹ CHANG Le² LIANG Jun-bin³ JIANG Chan⁴

(School of Computer Science and Educational Software, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)¹

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)²

(School of Computer, Electronics and Information, Guangxi University, Nanning 530004, China)³

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)⁴

Abstract Mobile opportunistic networks, which disseminate messages through the contact of mobile nodes, have become pervasive in many scenarios, e. g. , mobile social networks, VANET, mobile ad hoc networks, etc. These networks have attracted considerable attention in both the academic and industry community. In such networks, group communication of mobile opportunistic networks has been widely adopted in disaster rescue, community information dissemination, intelligent transportation, etc. , which makes multicast routing as a critical building block in the design of mobile opportunistic networks. This paper presented a survey on the state-of-the-art multicast strategies in mobile opportunistic networks. The multicast routing strategies were classified into two categories: traditional multicast routing and intelligent multicast routing. The algorithms in each category were discussed, with an emphasis on intelligent multicast routing. Different multicast routing strategies were compared and analyzed by using popular performance metrics. The conclusion is drawn that intelligent multicast routing strategies demonstrate desirable comprehensive performance in terms of data delivery ratio, transmission overhead, average delay, storage overhead and scalability, due to the consideration of the inherent characteristics of mobile opportunistic networks, e. g. , contact probability, stable social characteristics, limited node cache, exhausted energy consumption, selfish behaviors, etc. At last, corresponding research directions were discussed by concerning the cache management supporting big data, group communication security strategies, multicast in VANET and dynamic-sensing based multicast in mobile opportunistic networks.

Keywords Mobile opportunistic networks, Multicast routing, Traditional multicast routing, Intelligent multicast routing

1 引言

移动机会网络是一种新型的网络结构模型。在该网络模

型中,节点使用短距离移动设备进行组网,不需要网络基础设施;用消息代替传统网络中的报文分组;以逐跳“存储-携带-转发”的方式进行数据传输。这种新型的网络结构模式适用

到稿日期:2017-11-17 返修时间:2018-01-10 本文受国家自然科学基金(61702127),广州市科技计划(201804010461),广东工业大学青年百人计划(220413618),国家自然科学基金(61562005,61502540)资助。

邓 霞(1983—),女,博士,讲师,主要研究方向为移动网络协议设计与优化,E-mail:gzhu_dx@gzhu.edu.cn;常 乐(1981—),博士,讲师,主要研究方向为物联网、分布式系统,E-mail:lechang@gdut.edu.cn(通信作者);梁俊斌(1979—),男,博士,教授,主要研究方向为无线传感器网络、网络协议设计与优化,E-mail:liangjb@gxu.edu.cn;蒋 婵(1980—),女,博士,主要研究方向为网络协议设计与优化,E-mail:jiangchan@126.com。

于节点传输范围有限、能量存储空间有限、周边环境变化不可预测等场景,被广泛应用于各种端到端连接不稳定的无线网络场景中^[1-3],如深空间通信、无线自组网网络、传感器网络、车载自组网网络、移动社会网络、乡村通信网络等。

移动机会网络具有如下特点^[4-8]:1)高传输延时,如在 Ad hoc 网络中,节点的连接不是持续的,端到端的延迟很大;2)节点的能量和存储有限,如在传感器网络中由于受硬件资源的限制,节点的能量和存储空间非常有限;3)链路连接呈现间歇性,节点频繁移动、硬件故障、定期休眠等原因都会导致链路间歇性地断裂;4)拓扑动态变化,节点随时可能因移动、能量耗尽等原因离开当前的网络,拓扑结构不稳定;5)安全性差,恶劣的自然和敌对环境导致网络容易受到无线窃听、恶意攻击、自私性行为等安全攻击。

组播是在群组中对所有的节点进行数据传输,在移动机会网络中具有广泛而重要的应用价值^[9-12]。例如,在抢险救灾中,救援人员利用机会连接发送当前的灾难现场的信息和伤员情况给救灾组成员;在移动社会网络中,地理位置相近的节点利用机会连接在兴趣群中分发消息,如大型商场利用用户的移动机会连接来转发消息,在用户兴趣群中推送广告、打折信息及商场资讯;在高速列车上,基础传输设施不可靠,乘客利用机会连接在兴趣群中互相分享新闻、通知、路况等信息;在乡村网络中,由于受自然条件的影响,基础传输设施可能频繁断裂,对此可通过移动机会网络组播通信来实现社区消息的扩散。可见,无论是在抢险救灾安全领域,还是在大众移动通信领域,移动机会网络组播通信都具有极大的应用价值^[13-19],是社会发展和国民生活需要依赖的技术。因此,移动机会网络组播的相关问题具有重要的科学研究价值。

在移动机会网络中,与单播类似,组播路由中的数据与转发依然采用“存储-携带-转发”的模式。组播数据转发的基本过程如图 1 所示。假设源端 S 发送数据到组播组 D,组播组包含两个组播成员 D₁ 和 D₂,S 通过与节点 2(见图 1(a))和节点 4(见图 1(b))相遇将数据转发给 D₁(见图 1(c)),S 通过与节点 2 和节点 3 相遇将数据转发给 D₂(见图 1(c))。

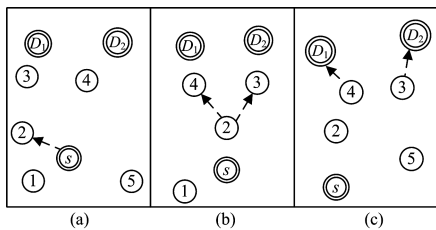


图 1 移动机会网络的组播数据转发

Fig. 1 Multicast data delivery in mobile opportunistic networks

移动机会网络中组播的重要应用价值促使组播路由的设计成为国内外的研究热点。最初,研究者考虑利用移动机会网络单播和广播路由来实现组播,但是由于网络链路容易断裂、传输延迟大、节点缓存有限等,这类方法都存在数据到达率低、传输开销大等问题。在移动机会网络的前身即移动自组网中,研究者提出基于转发组策略的 ODMRP^[14]。ODMRP 选择一组转发节点来负责数据的转发,提供的冗余路由可以较好地适应移动自组网拓扑变化的环境。但是,在

移动机会网络中,链路断裂更加频繁、网络数据延迟更大、消息传输需要采用“存储-携带-转发”的模式,这些新特性使得 ODMRP 协议无法直接应用于移动机会网络的组播路由中。此外,移动机会网络中的组播成员可能在消息到达之前就离开了组播组,或者有其他新节点加入了组播组,这种成员动态性也给路由算法的设计带来了很大挑战。

鉴于移动机会网络具有拓扑动态变化、通信链路容量小、节点缓存容量及能源有限等特点,目前研究者主要考虑节点的网络拓扑变化、网络社会特性、链路可用性、节点缓存、节点能量及安全等特性来设计组播路由算法。本文将组播路由分为传统组播和智能组播两大类,总结了当前移动机会网络组播路由领域已有的工作。其中,传统组播利用无线网络和移动自组网已有的组播路由,包括基于单播、基于广播、基于树及基于转发组的组播路由;智能组播考虑移动机会网络自身的特性(如移动特性、社会特性、节点能量有限等),包括基于连接概率特性、社会特性、消息缓存管理策略、能量优化、安全策略及智能传输模式的组播路由。本文从到达率、时延、负载均衡、存储空间及可扩展性角度,对各组播路由进行了比较和分析。结果显示,相比于传统组播,智能组播具有更高的数据传输效率、更低的传输开销及更好的可扩展性等。最后,鉴于目前仍然缺乏智能组播路由在大数据缓存传输、群组通信安全问题、车载自组网组播及动态感知组播路由方面的深入研究,本文对移动机会网络组播路由进一步的研究方向进行了分析与展望。

本文第 2 节介绍移动机会网络组播路由的分类,即传统组播和智能组播,以及传统组播中的主要策略;第 3 节介绍各智能组播的设计思想和算法;第 4 节利用移动机会网络的主流性能评价指标对各组播策略进行比较分析和综述;最后给出结论并展望该领域下一步的研究方向。

2 移动机会网络组播路由的分类

在移动机会网络中,数据采取“存储-携带-转发”的异步方式进行消息传递,组播路由设计数据的复制和转发策略。本文将目前移动机会网络中的组播路由分为两类:传统组播路由和智能组播路由。其中,传统组播路由包括:1)基于单播的组播路由;2)基于广播的组播路由;3)基于树的组播路由;4)基于转发组的组播路由。相比于传统组播路由,智能组播路由将移动机会网络本身的特点纳入考虑范围并融入路由设计,如考虑移动连接概率、社会特性、节点的缓存管理、能量优化、安全策略及智能传输模式等因素。移动机会网络组播路由的具体分类如图 2 所示。

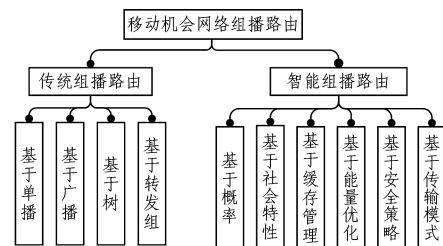


图 2 移动机会网络组播路由协议的分类

Fig. 2 Classification of multicast routing strategies in mobile opportunistic networks

2.1 传统组播路由

传统组播路由主要采用无线网络或者移动自组网络中已有的组播路由方法来实现移动机会网络的组播路由,主要包括基于单播、基于广播、基于树及基于转发组的组播路由。

1) 基于单播的组播路由

该策略对移动机会网络的单播进行扩展,从而实现组播,如UBR算法^[10]。数据从源端到每个目的端都通过单播传输,如图3(a)所示。由于源端对组播的所有成员都进行了一次单播传输,中间节点可能转发了多次数据副本,因此数据传输开销很大。当组播成员增多时,网络的负载增大,协议的有效性降低。

2) 基于广播的组播路由

基于广播的组播路由(如Epidemic算法)中,消息以泛洪的方式转发给接收者,如图3(b)所示。这种方法的数据到达率高,但是泛洪本身的特点导致消息复制多、传输开销大,且存在“广播风暴”的问题。鉴于此,文献[9]提出了改进的Epidemic算法——ECMA。ECMA记录消息的转发次数,并且对其加以限制。另外,ECMA维护相遇节点的个数,以此来感知网络的稀疏程度,从而自适应地调节消息的转发次数。通过这些措施,整个网络的消息转发次数得以减少,传输开销得到降低。

3) 基于树的组播路由

在基于树的组播路由中,源端建立一棵以源端为根、以接收者为叶子的组播树,用于转发数据。消息沿着组播树,从源端复制数据到接收端,如图3(c)所示。基于树的路由包括静态树和动态树两种。①基于静态树:在组播会话之前,源端就建立组播树,在组播会话完成之前,组播树的拓扑结构不会发生改变,消息沿着组播树复制到接收者。静态树的问题在于不能动态地适应网络拓扑的变化,延迟较大,数据到达率较低。②基于动态树:相比于静态树,动态组播树可以根据网络的拓扑结构进行动态调节。OS-Multicast^[13]算法基于以下假设:下层网络可以发现、报告及记录路由信息,中间节点为数据束建立一个逐跳的组播树。相比于静态树,动态树方法更适应移动机会网络拓扑动态变化的情形,提高了数据到达率,但是延迟依然较大。

4) 基于转发组的组播路由

On-Demand Multicast Routing Protocol (ODMRP)^[14]中涉及到了转发组(Forwarding Group)的概念。对于每个组播组,源端选择到所有组播成员的最短路径上的节点构成转发组。该转发组负责数据转发,数据会被限制在转发组中进行洪泛,如图3(d)所示。针对移动机会网络链路断裂频繁的问题,基于转发组的路由策略可以提供多余的链路,能够有效地提高数据到达率,适用于链路断裂频繁的网络场景。另外,数据只在转发组节点间泛洪,转发组节点个数有限,因此其传输开销比基于广播算法的传输开销小。

上述几种组播路由中,基于单播的组播路由的传输开销大、延迟大、数据到达率低;基于广播的组播路由虽然数据到达率高且延迟较低,但是由于以广播方式发送消息,因此数据传输开销很大;基于树的组播路由因为需要建立和维护组播树,维护成本较高,同时延迟较大且数据到达率较低;基于转发组的

组播路由使用了一组转发组节点来负责数据转发,更适用于移动机会网络链路断裂频繁、拓扑动态变化的情况,保证了一定的数据到达率和较低的数据开销,综合性能相对较好。

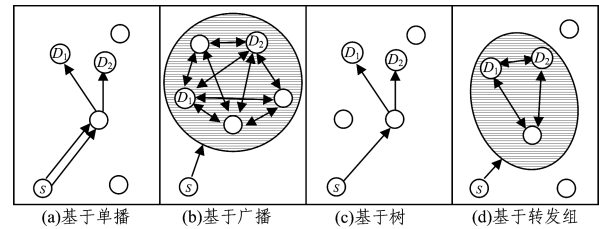


图3 传统组播路由协议的数据转发原理

Fig. 3 Principle of data delivery of traditional multicast routing protocols

2.2 智能组播路由

以上4种传统的组播路由都未充分利用移动机会网络的独特性。很多研究者在传统组播路由策略的基础上,利用节点转发概率、社会特性、能量优化、缓存管理、安全策略等移动机会特性来设计组播路由算法。本文统一称这类组播路由为智能组播。

智能组播路由考虑了移动机会网络自身的特性,如移动概率特性、相对稳定的社会特性、节点的缓存及能量有限等特性,因此表现出了比传统组播路由更好的综合性能。本文进一步将智能组播路由分为以下几类:1)基于概率的智能组播路由,考虑移动机会网络节点的移动连接特性;2)基于社会特性的智能组播路由,考虑网络节点之间相对稳定的社会特性;3)基于缓存管理的智能组播路由,考虑在“存储-携带-转发”方式中节点缓存策略的设计;4)基于能量优化的智能组播路由,考虑节点能量有限的问题;5)基于安全策略的智能组播路由,考虑节点的自私性行为及安全问题;6)基于传输模式的智能组播路由,考虑采用不同于多跳传输的两跳传输和长距离传输策略。下一节将详细介绍这几种智能组播路由算法。

3 移动机会网络的智能组播路由

根据之前对智能组播的分类,本节将介绍各类组播路由算法及其特点。

3.1 基于概率的组播路由

在移动机会网络中,节点间通过机会连接进行通信,节点的连接概率可作为数据转发的重要参考依据。

文献[16]提出了EBMR(Encounter-based Multicast Routing),该协议将移动机会网络的单播路由PROPHET扩展为组播路由算法。在EBMR中,节点计算其相遇节点与任意一个组播成员的转发概率,并且选择最大转发概率对应的节点来转发消息。由于每个节点为组播接收者选择了具有较高转发概率的节点转发数据,EBMR总体上能够实现较高的数据到达率。

文献[17]计算节点到目的地的概率和在网络中的活跃程度,并在此基础上提出了一种非复制组播路由算法NR(Non-replication Multicastin Scheme)。节点记录所有连接的历史信息,计算它到组播目的地的概率和在网络中的活跃程度。节点首先比较其与相遇节点到达目的地的概率,如果相遇节

点的概率更大,则根据它和相遇节点在网络中的活跃程度比率分配消息副本。通过比较和分裂的过程,建立一棵从源端到所有目的地的动态转发树。NR 同时考虑了节点到组播目的地的概率和在网络中的活跃程度,因此能够获得较高的数据到达率。

为了降低传输开销,文献[18]通过将代理转发的思想应用到移动机会网络的组播路由中,设计了 DFM(Delegation Forwarding Multicast)算法。DFM 将节点到达目的地的概率作为路由指标,节点只将消息转发给到目前为止到达概率最大的节点。本文对代理转发与单复制组播、多复制组播在转发次数和延迟上进行了比较和分析。结果显示,单复制组播的数据转发次数最少,多复制组播的数据转发次数最多,而代理转发具有最小的延迟和较少的数据转发次数。

EBMR 和 NR 通过历史连接信息来预测未来连接的可能(即连接概率),并根据连接概率选择转发节点,优化了数据的转发过程,表现出了较高的数据到达率和较低的传输开销。代理转发组播路由 DFM 只将数据转发给到目前为止转发概率最大的节点,数据到达率高、延迟低、传输开销小。

3.2 基于社会特性的组播路由

移动机会网络中,节点移动和间歇性连接给数据转发带来了很大挑战,但研究者发现移动机会网络中的社会特性相对稳定,节点的活动往往集中在固定社区,同一社区的节点具有相似的兴趣爱好,节点间连接频繁^[19-22]。如图 4 所示,网络被分成 4 个社区: c_1 , c_2 , c_3 及 c_4 。网络节点主要在某个社区内活动,偶尔进行社区间的活动。相比于跨社区接触,社区内节点的接触更加频繁。利用这些社会特性能发现移动机会网络中的稳定路径,从而设计更有效的组播路由算法。

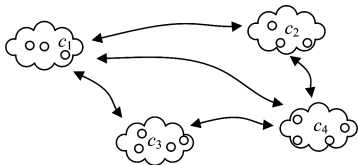


图 4 移动机会网络的社会特性

Fig. 4 Social characteristics of mobile opportunistic networks

文献[23]研究了单数据源和多数数据源传输的组播通信场景,提出了基于社会特性的组播路由算法 SDM(Single-Data Multicast)和 MDM(Multiple-Data Multicast)。SDM 和 MDM 通过分析节点的社会属性,将聚集连接概率作为节点的中心性。源端选择社会中心性强的节点来转发数据,并将该选择问题转化为背包问题。因为中心性强的节点能使数据更有效地传输到目的地,所以该算法的数据到达率高、数据传输开销小。

文献[11]分析了移动自组网络的组播性能,提出了两层网络模型,分别是社会层和网络层。基于两层模型和实验分析,得到目的位置的概率密度函数,然后提出基于欧氏最小生成树的组播路由策略 EMST 来减小数据传输的开销,提高数据到达率。该工作理论分析和验证了移动自组网络中社会关系和组播成员个数对组播性能的影响。

文献[24]提出了考虑社交属性的组播路由算法 SPM。针对历史连接信息的高维护开销问题,SPM 充分利用了节点

的静态社交属性,如附属机构、语言、城市、职位等。这些社交属性相对静态、轻量、易于维护,并且能够反映节点未来连接的可能性。SPM 首先分析 Infocom06 真实跟踪数据,然后分析并提取最重要和独立的两种社会属性:附属机构和语言。基于该结论,SPM 综合考虑附属机构和语言这两大关键属性来确定转发策略,即优先转发给归属邻近附属机构或拥有共同语言的节点。SPM 不仅维护开销小,而且数据到达率高,传输开销低。

文献[25]提出了基于动态社会属性的 Multi-Sosim 组播路由。根据节点的历史连接记录,计算在历史时间内某一社会属性占全部社会属性的连接比率,定义了节点间的动态社会特性。基于此,通过计算节点之间具有相似社会属性的连接频率,定义动态相似性。Multi-Sosim 利用全连接聚类方法将网络节点划分成两个社区,然后在数据转发过程中计算各中继节点到各社区的动态相似性,并从中选择相似性高的节点来转发数据。由于采用了动态社会特性和社区划分机制,Multi-Sosim 能够更精确地刻画节点的动态社会行为,提高了数据到达率并降低了延迟。

SDM, ESMT, Multi-Sosim 及 SPM 考虑了中心性、相似性、社交属性等社会特性,使得组播路由在较小的传输开销下也能实现较高的数据传输效率和较低的延迟。此外,这些协议避免了历史信息维护的高开销,具有较好的可扩展性和存储性能。

3.3 缓存管理组播路由

移动机会网络中的数据转发采用“缓存-携带-转发”模式,但由于移动设备缓存通常有限,因此设计合理的缓存管理策略具有重要意义。

文献[26]提出了一种缓存时间和到达率受限情况下的组播路由 E_DBCM(Enhanced Delivery Ratio-and Buffer Time-Constrained Multicast)。E_DBCM 基于节点之间的平均连接时间间隔服从指数分布这一发现来预测最大缓存时间下的最大传输概率,再根据传输概率选择转发节点。实验结果显示, E_DBCM 能够提高数据到达率并降低传输开销。

文献[27]提出了基于消息配额的组播路由算法 QBMR(Quota-Based Multicast Routing)。节点首先根据邻居节点的平均缓存占有率来估计网络的通信负载,从而调整消息的配额数;并且根据缓存中消息的接收时间和跳数来确定节点传输消息的先后顺序。基于真实跟踪数据的实验证明, QBMR 能够有效降低数据传输的开销,并保持较高的数据到达率。

E_DBCM 和 QBMR 考虑节点的最大缓存时间和平均缓存占有率等因素来设计数据的转发策略,能够提高组播路由的数据传输效率,即具有较高的数据到达率和较低的传输开销。

3.4 能量优化组播路由

移动机会网络节点通常采用蓝牙、Wi-Fi 等方式通信,受硬件或者环境等的影响,节点的能量非常有限。在持续地探测邻居节点,发送及接收数据的过程中,节点能量消耗大,因此设计有效的能量管理策略非常关键。

文献[28]提出了考虑节点认知能力的能量有效组播路由 GMEE(Global optimal Multicast with Minimum Energy Con-

sumption)。该方法利用定向接收天线,提出了定向接收两步重构路由算法,以此来建立组播转发树。GMEE 提出了两种组播树构建算法,这些组播树中的节点能量消耗最小,大大延长了组播树的生存时间。

鉴于基于社会特性的组播路由 SDM^[23]没有考虑节点能量有限的问题,文献[29]提出考虑了节点的社会中心性和剩余能量的组播路由 EASDM(Energy-Aware Single-Data Multicast),在选择中继节点时综合考虑了节点的社会活跃程度和剩余能量。实验结果显示,EASDM 增加了网络的生存时间,提高了转发效率。

GMEE 和 EASDM 通过对节点能量因素的考虑和优化,延长了网络中节点的平均生存时间,从而延长了网络的生存时间并提高了组播路由的数据转发效率。

3.5 安全策略组播路由

移动机会网络利用大量的便携设备来感知物理世界,但是收集和传输数据需要耗用户的资源,且存在个人隐私泄露的风险。出于节约能量和安全性等方面的考虑,用户参与合作的意愿相对较低,存在拒绝转发数据的自私性行为。图 5 举例说明了节点的自私性行为对组播路由的影响。源端 S 发送数据到组播组 (D_1, D_2, D_3),其最佳路径为 $\{S, R_1, R_5, R_6\}$ 。相比于采用路径 $\{S, R_1, R_2, R_3\}$ 传输数据到组播成员 D_1 的方案,采用最佳路径方案的传输次数更少。但是,出于自身能量保护、兴趣爱好及保护团体利益等的考虑,网络节点表现出了一定的自私性行为,如 R_4 拒绝转发并丢弃数据从而导致最佳路径断裂。这些自私性行为给组播路由带来了很大威胁,因此研究自私性行为对组播性能的影响非常重要。

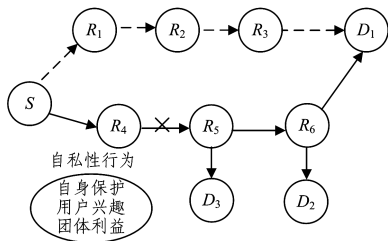


图 5 移动机会网络的自私性行为对组播路由的影响

Fig.5 Impact of selfish node behaviors of mobile opportunistic networks on multicast routing

文献[30]利用连续马尔可夫链模型来刻画自私性行为下消息的转发过程,并分析其对组播性能的影响。考虑两跳转发和泛洪组播两种情况,研究消息传输的平均延迟和传输成本,分析不同的自私性行为对组播路由的影响。研究结果显示,自私性行为对洪泛组播的影响较大,且影响程度取决于组播组的大小。

文献[31]针对网络中节点为保护自身能量而普遍存在的自私性行为,提出了基于激励机制的多接收者路由算法 MuRIS(Multi-Receiver Incentive-based Dissemination)。该算法中每个节点保存历史路径和用户兴趣信息,通过使用收费和奖励机制来促进节点间的合作。MuRIS 不仅促进了节点之间的合作,还减少了数据组播转发树的跳数,提高了组播转

发效率,降低了传输开销。

现有工作对移动机会网络组播中的节点自私性行为问题进行了建模分析,也提出了一些针对性的协议算法。其中, MuRIS 协议根据节点的路径和用户兴趣信息制定激励机制,促进节点之间的合作,提高了组播通信的效率,降低了网络传输开销。

3.6 传输模式组播路由

在移动机会网络中,除了上述基于多跳路由转发的组播路由传输模式,研究者还提出了两种智能传输模式:基于两跳转发和长距离传输。

1)两跳转发。文献[32]提出了 RELAYCAST(I-hopRelay-based Multicast),将移动机会网络单播路由由两跳转发策略应用到组播路由中。源端将消息转发给一组距离源端只有一跳的中继转发节点,然后中继转发节点又将消息传送给所有的组播接收者。根据理论分析,RELAYCAST 能取得比传统的多跳路由更大的吞吐量,并能到达移动机会网络组播路由吞吐量的上界。

2)长距离传输。由于移动机会网络中链路断裂频繁,文献[33]在短距离传输的基础上提出加入长距离传输来提高数据的到达率。由于长距离传输的代价较大,将在一定条件下找到最小长距离传输集合的问题规约为集合覆盖问题(NP 难)。在已知用户运动轨迹和用户需求的情况下,为有效地从源端获取最新的数据消息,提出了一种图索引组播路由 GIM(Graph Indexing Multicast)。GIM 根据用户的轨迹和需求信息,在合理的时间和需求内提供优化集合覆盖问题方案。该算法可为大规模组播用户提供有效的组播路由,并降低空间开销。

相比于普通传输模式,RELAYCAST 采用了两跳路由进行数据转发,虽然产生了较大的延迟,但降低了传输开销,提高了到达率。GIM 为满足实际用户需求,增加了长距离传输来提高数据到达率并降低能源消耗,具有很好的扩展性,适应于大规模通信场景。

4 协议比较与分析

4.1 主要性能评价指标

移动机会网络节点频繁移动,链路间歇性连接,组播成员可能随时退出和加入,因此组播在移动机会网络中呈现数据传输效率低、延迟大、延迟不均等特点。目前,研究者对移动机会网络组播采用的主要性能评价指标如下^[19,21,34]。

1)到达率,指组播成员节点成功接收到的数据与期望被接收到的数据之间的比率。包括两种情况:①所有组播成员节点到达率的平均值;②所有组播成员节点到达率的最差值。因为移动机会网络链路断裂频繁,节点的存储容量小且处理能力差,数据更容易因丢弃而不能到达最终目的地。因此,移动机会网络中数据的到达率要比传统网络的到达率低。

2)传输平均开销,指网络中数据转发的次数与接收者接收到的数据的比率。移动机会网络中的节点能量和处理能力有限,在组播路由设计中希望尽可能减少转发次数,提高资源

利用率。因此,传输平均开销是衡量移动机会网络组播路由性能的一个重要指标。

3) 延迟,指网络中数据从发送源端传输到组播成员节点间所消耗时间的总和,通常取为组播所有接收节点的延迟平均值。移动机会网络中节点之间呈现间断性连接,比一般的无线网络延迟更大。虽然移动机会网络较传统网络对延迟的

容忍度更高,但延迟仍然是刻画组播路由性能的重要指标。

4.2 性能分析与比较

根据前文所述的移动机会网络组播路由分类和主要性能指标,本节从到达率、负载开销、数据延迟、存储开销及可扩展性等方面对各组播路由进行分析 and 比较。综合分析比较结果如表 1 所列。

表 1 移动机会网络组播路由算法的性能比较

Table 1 Performance comparison of multicast routing protocols in mobile opportunistic networks

路由分类	路由方法	路由协议	到达率	时延	负载开销	存储空间	可扩展性
传统组播	基于单播	UBR	低	大	高	中	差
	基于广播	Epidemic	高	小	高	大	差
	基于广播	ECMA	高	小	中	较大	差
	基于树	STBR	中	中	中	小	差
	基于树	OS-Multicast	高	较大	中	小	差
	基于转发组	ODMRP	高	较小	较大	中	差
智能组播	基于概率	EBMR	高	大	中	中	中
	基于概率	CAMR	高	中	中	中	中
	基于概率	NR	高	中	低	中	中
	基于概率	DFM	高	低	较低	中	中
	基于社会特性	SDM, MDM	高	中	低	中	中
	基于社会特性	EMST	高	中	低	中	好
	基于社会特性	Multi-Sosim	高	低	低	中	中
	基于社会特性	SPM	高	低	低	小	好
	基于缓存	E_DBCM	高	较低	低	中	中
	基于缓存	QBMR	高	中	低	中	中
	基于能量	GMEE	高	中	低	中	中
	基于能量	EASDM	高	低	较低	中	中
	基于安全	MuRIS	高	低	低	中	中
	基于传输模式	RELAYCAST	高	大	较低	中	中
基于传输模式	GIM	高	较大	较低	较大	好	

基于单播和基于树的组播路由虽然能源消耗少,但是不能很好地适应移动机会网络链路频繁断裂的情况,因此数据到达率不高,且可扩展性差;基于广播和基于转发组的组播路由虽然到达率较高、延迟较小,但是由于参与数据转发的节点多,因此负载开销较大,数据转发效率低,存储空间消耗大,并且可扩展性差。传统的移动机会网络组播路由都存在可扩展性差的问题,而智能组播可以在保证传输效率的前提下,具备较好的可扩展性。基于概率的组播路由根据连接概率选择节点来转发数据,表现出了较高的数据到达率和较低的传输开销。由于移动机会网络具有相对稳定的社会特性,基于社会特性的组播路由考虑中心性、相似性、兴趣资料等社会特性,因此组播路由在较小的传输开销下也能实现较高的数据传输效率和较低的延迟,并且具有较好的可扩展性和存储开销。针对移动机会网络数据的转发模式及缓存有限的特点,基于缓存管理策略的组播路由通过考虑节点的缓存情况来设计数据转发算法,以降低数据传输开销并提高数据到达率。移动机会网络中节点的能量有限,基于节点能量的组播路由通过考虑节点能量等因素,可延长网络中节点的平均生存时间,从而延长网络的生命并提高转发效率。基于安全策略的组播路由考虑了节点的自私性行为,采用一定的激励机制来促进节点间的合作,提高了组播通信的效率并降低了网络传输开销。基于传输模式的组播路由通过采用两跳转发和长距离传输的方式,提高了数据到达率,在低传输开销或者大规模通信场景中具有一定的应用价值。

总之,相比于传统组播,智能组播能更好地适应移动机会

网络中连接频繁断裂、具有社会特性、缓存和能源有限等应用场景,表现出数据到达率高、负载开销小及可扩展性良好等特点。另外,综合考虑延迟和存储空间指标,基于社会特性、缓存、能量及安全的组播路由表现出更好的综合性能。在实际情况下,用户可以根据具体的应用场景和需求选择不同的路由算法。

结束语 移动机会网络具有节点移动频繁、缓存和能源有限及端到端延迟大等特点。组播可节省带宽并提高资源利用率,能有效地应用于应急救灾、移动社会网络及交通网络等组播通信场景中。本文将组播路由分为传统组播及智能组播两大类。基于移动机会网络组播路由的主要性能指标包括到达率、时延、负载开销、存储空间及可扩展性,基于以上指标对各种组播路由算法进行了比较与分析。智能组播由于利用了移动机会网络连接概率、社会特性、缓存管理、能量优化及安全等特性,相比于传统组播路由,具有高数据到达率、低负载开销及良好的可扩展性,表现出了较好的综合性能。各种组播路由算法都有其适用范围,用户可根据具体的应用场景和需求选择不同的组播路由算法。

智能组播路由虽然利用移动机会网络特性提高了组播路由的性能,但是在面向大数据组播数据传输、群组安全通信、车载组播通信及动态感知组播路由方面还缺乏深入的研究,依然面临着诸多挑战。移动机会网络的进一步研究方向主要包括如下几个部分。

1) 面向大数据的组播路由缓存策略。随着便携式手持设备的推广,移动机会网络中传输的数据包大小可从文本文件

的kB扩展到媒体文件的GB。对于多媒体文件传输,由于移动机会网络中连接的持续时间短,数据可能无法在一次连接中全部完成传输。而已有对组播路由缓存管理策略的研究并没有考虑数据无法在一次通信中完成传输的情况,因此需要设计大数据传输下的节点协作通信。

2) 群组安全策略。在移动机会网络中,相对稳定的社会特性也会带来一定的负面作用,如节点自私性行为。基于自私性行为的组播路由虽然已经得到初步研究^[33],但是还未充分考虑组播通信的特点。相比于单播,在组播通信中,群组和社团通常表现出更强的社会特性,自私性行为带来的负面作用将更大。这些自私行为都不利于网络节点间的协作通信。深入分析组播节点转发和合作的多重身份,设计组播路由的自私性安全策略,仍须进一步研究。

3) 车载自组网组播。移动机会网络已经在以汽车为节点的车载自组网中得到了广泛应用,并在智能交通发展中具有重要意义^[34]。组播通信可在车载自组网群组信息收集、群组通信管理及交通管理方面发挥重要作用,其组播路由具有重要的应用价值。分析车载自组网中节点的移动规律,预测网络的拓扑变化和链路质量,并根据群组通信的特点来优化组播数据的转发过程十分关键。因此,高效率的基于车载自组网的组播路由也是将来的主要研究方向。

4) 动态感知组播路由。随着移动机会网络规模的扩大,其在广阔的深海、空间领域、智能交通及社交网络中都具有巨大的应用需求。相比于传统网络,这些应用场景具有用户参与数量多、网络感知数据量大、节点感知的持续时间长且感知不确定等特点。考虑节点的接触特性、自身状态、感知能力及社会特性,设计有效的动态感知组播路由来满足具体环境下的组播应用是需要进一步研究的问题。

参 考 文 献

- [1] CERF V, BBRLEIGH S, HOOKE A, et al. Delay-tolerant networking architecture [EB/OL]. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4838.txt>.
- [2] CHAKCHOU N. A Survey on Opportunistic routing in wireless communication networks [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(4): 2214-2241.
- [3] HU X, CHU T H S, LEUNG V C M, et al. A survey on mobile social networks: Applications, platforms, system architectures, and future research directions [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(3): 1557-1581.
- [4] MA H D, YUAN P Y, ZHAO D. Research progress on routing problem in mobile opportunistic networks [J]. *Journal of Software*, 2015, 26(3): 600-616. (in Chinese)
马华东, 袁培燕, 赵东. 移动机会网络路由问题研究进展[J]. *软件学报*, 2015, 26(3): 600-616.
- [5] LIN C, DONG Y W, SHAN Z G. Research on space internet-working service based on DTN [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2014, 51(5): 931-943. (in Chinese)
林闯, 董扬威, 单志广. 基于DTN的空间网络互联服务研究综述[J]. *计算机研究与发展*, 2014, 51(5): 931-943.
- [6] HE X, DAI H, NING P, et al. A multi-player Markov stopping game for delay-tolerant and opportunistic resource sharing networks [C]// *IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*. San Francisco: IEEE Press, 2016: 1-9.
- [7] SAKAI K, SUN M T, KU W S, et al. An Analysis of onion-based Anonymous Routing for Delay Tolerant Networks [C]// *IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*. Nara: IEEE Press, 2016: 609-618.
- [8] ZHANG S, WU J, LU S. Distributed workload dissemination for Makespan minimization in disruption tolerant networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2016, 15(7): 1661-1673.
- [9] JIN Z, WANG J, ZHANG S, et al. Epidemic-based controlled flooding and adaptive multicast for delay tolerant networks [C]// *Symposia and Workshops on Ubiquitous, Autonomic and Trusted Computing*. Washington: IEEE Press, 2010: 191-194.
- [10] PATRA S, SAHA S, SHAH V, et al. A qualitative survey on multicast routing in delay tolerant networks [J]. *Communications in Computer and Information Science*, 2011, 162: 197-206.
- [11] QIN Y, JIA R, ZHANG J, et al. Impact of social relation and group size in multicast ad hoc networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2015, 15(7): 1661-1673.
- [12] LUO J, ZHANG J, YU L, et al. The role of location popularity in multicast mobile ad hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(4): 2131-2143.
- [13] YE Q, CHENG L, CHUAH M C, et al. OS-Multicast: On-demand situation-aware multicasting in disruption tolerant networks [C]// *Proceedings of the IEEE 63rd Vehicular Technology Conference*. Melbourne: IEEE Press, 2006: 96-100.
- [14] LEE S J, SU W, GERLA M. On-demand multicast routing protocol in multi-hop wireless mobile Networks [J]. *Mobile Networks and Applications*, 2002, 7(6): 441-453.
- [15] CHUAH M C, YANG P. Context-Aware multicast routing scheme for disruption tolerant networks [J]. *Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, 2009, 4(5): 269-281.
- [16] XI Y, CHUAH M C. An encounter-based multicast scheme for disruption tolerant networks [J]. *Computer Communications*, 2009, 32(16): 1742-1756.
- [17] WANG Y, WU J. A dynamic multicast tree based routing scheme without replication in delay tolerant networks [J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2012, 72(3): 424-436.
- [18] WANG Y, LI X, WU J. Delegation forwarding in delay tolerant networks multicasting [J]. *Journal of Communications*, 2011, 6(5): 384-392.
- [19] ZHU Y, XU B, SHI X, et al. A survey of social-based routing in delay tolerant networks: Positive and negative social effects [J]. *Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(1): 387-401.
- [20] WEI K, LIANG X, XU K. A survey of social-aware routing protocols in delay tolerant networks: Applications, taxonomy and design-related issues [J]. *Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(1): 556-578.
- [21] HU J, YANG L L, HANZO L. Distributed multistage cooperative-social-multicast-aided content dissemination in random mobile networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(7): 3075-3089.

- [22] DENG X, WANG J, CHANG L. Sociality-based comprehensive buffer management for multicast in DTNs [J]. *International Journal of Information and Communication Technology*, 2015, 7(2/3): 263-277.
- [23] GAO W, LI Q, ZHAO B, et al. Multicasting in delay tolerant networks: A social network perspective [C]// *Proceedings of the 10th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. New York: ACM Press, 2009: 299-308.
- [24] DENG X, CHANG L, TAO J, et al. Social profile-based multicast routing scheme for delay-tolerant networks [C]// *IEEE International Conference on Communications*. Budapest: IEEE Press, 2013: 1857-1861.
- [25] CHEN X, SHANG C, WONG B, et al. Efficient multicast algorithms in opportunistic mobile social networks using community and social features [J]. *Computer Networks*, 2016, 111: 71-81.
- [26] JIANG G, CHEN J, SHEN Y. Delivery ratio- and buffered time-constrained Multicasting for Delay Tolerant Networks [J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2014, 44(9): 92-105.
- [27] LO S, LUO N, GAO J, et al. Quota-based multicast routing in delay-tolerant networks [J]. *Wireless Personal Communications*, 2014, 74(4): 1329-1344.
- [28] JIANG D, XU Z, LV Z. A multicast delivery approach with minimum energy consumption for wireless multi-hop networks [J]. *Telecommunication Systems*, 2016, 62(4): 771-782.
- [29] ROY A, ACHARYA T, DASBIT S. Energy-aware social-based multicast in delay-tolerant networks [C]// *IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC)*. Boston: IEEE Press, 2015: 1-5.
- [30] LI Y, SU G, WU D O, et al. The impact of node selfishness on multicasting in delay tolerant networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(5): 2224-2238.
- [31] WANG Y, CHUAH M C, CHEN Y. Incentive based data sharing in delay tolerant mobile networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(1): 370-381.
- [32] LEE U, OH S Y, LEE K W, et al. RelayCast: Scalable multicast routing in delay tolerant networks [C]// *Proceedings of the 16th IEEE Conference on Network Protocols*. Orlando: IEEE Press, 2008: 218-227.
- [33] MONGIOVI M, SINGH A K, YAN X, et al. Efficient multicasting for delay tolerant networks using graph indexing [C]// *Proceedings of the 31st Annual IEEE International Conference on Computer Communications*. Orlando: IEEE Press, 2012: 1386-1394.
- [34] REN J, ZHANG G, LI D. Multicast capacity for VANETs with directional antenna and delay constraint under random walk mobility model [J]. *IEEE Access*, 2017, 5(99): 3958-3970.
- (上接第 18 页)
- [39] CAI K, ZHANG M, FENG D G. Secure Range Query with Single Assertion on Encrypted Data [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2011, 34(11): 2093-2103. (in Chinese)
蔡克, 张敏, 冯登国. 基于单断言的安全的密文区间检索 [J]. *计算机学报*, 2011, 34(11): 2093-2103.
- [40] TIAN H B, HE J J, FU L Q. A Privacy Preserving Fair Contract Signing Protocol based on Block Chains [J]. *Journal of Cryptologic Research*, 2017, 4(2): 187-198. (in Chinese)
田海博, 何杰杰, 付利青. 基于公开区块链的隐私保护公平合同签署协议 [J]. *密码学报*, 2017, 4(2): 187-198.
- [41] SHEN X, PEI Q Q, LIU X F. Survey of block chain [J]. *Chinese Journal of Network and Information Security*, 2016, 2(11): 11-20. (in Chinese)
沈鑫, 裴庆祺, 刘雪峰. 区块链技术综述 [J]. *网络与信息安全学报*, 2016, 2(11): 11-20.
- [42] LI Y, HE J B, LI J H, et al. Research of America Cyber Threat Intelligence Sharing Frameworks and Standers [J]. *Secrecy Science and Technology*, 2016(6): 16-21. (in Chinese)
李瑜, 何建波, 李俊华, 等. 美国网络威胁情报共享技术框架与标准浅析 [J]. *保密科学技术*, 2016(6): 16-21.
- [43] LIN C X, XUE L M, HAN S. Analysis of the development and application of Network Security Threat Intelligence [J]. *Network Security Technology and Application*, 2016(6): 12-13. (in Chinese)
林晨希, 薛丽敏, 韩松. 浅析网络安全威胁情报的发展与应用 [J]. *网络安全技术与应用*, 2016(6): 12-13.
- [44] ZHANG Q, LI J H. Research on real time performance analysis of information sharing model based on publish-subscribe [J]. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2013, 27(1): 33-35. (in Chinese)
张强, 李建华. 基于发布/订阅的信息共享模型实时性能分析研究 [J]. *军事运筹与系统工程*, 2013, 27(1): 33-35.
- [45] JASPER S E U S. Cyber Threat Intelligence Sharing Frameworks [J]. *International Journal of Intelligence & Counterintelligence*, 2017, 30(1): 53-65.
- [46] QAMAR S, ANWAR Z, RAHMAN M A, et al. Data-driven analytics for cyber-threat intelligence and information sharing [J]. *Computers & Security*, 2017, 67: 35-58.
- [47] AGRAWAL R, EVFIMEVSKI A, SRIKANT R. Information sharing across private databases [C]// *Proceedings of the 2003 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. New York: ACM, 2003: 86-97.
- [48] APPALA S, CAM-WINGET N, MCGREW D, et al. An Actionable Threat Intelligence system using a Publish-Subscribe communications model [C]// *ACM Workshop on Information Sharing and Collaborative Security*. New York: ACM, 2015: 61-70.
- [49] DOG S E, TWEED A, ROUSE L R, et al. Strategic Cyber Threat Intelligence Sharing: A Case Study of IDS Logs [C]// *International Conference on Computer Communication and Networks*. New York: IEEE, 2016: 1-6.
- [50] KSHETRI N. Recent US Cybersecurity Policy Initiatives: Challenges and Implications [J]. *Computer*, 2015, 48(7): 64-69.
- [51] CHRISTOPHER A, AUDREY D. OCTAVESM * Threat Profiles [EB/OL]. [http://trygstad.rice.iit.edu/8000/Audits/octave/OCTAVETHreatProfiles\(CERT\).pdf](http://trygstad.rice.iit.edu/8000/Audits/octave/OCTAVETHreatProfiles(CERT).pdf).
- [52] SILLABER C, SAUERWEIN C, MUSSMANN A, et al. Data Quality Challenges and Future Research Directions in Threat Intelligence Sharing Practice [C]// *ACM on Workshop on Information Sharing and Collaborative Security*. New York: ACM, 2016: 65-70.