

容迟网络多副本路由技术研究

徐佳¹ 王汝传¹ 徐杰² 廖俊²

(南京邮电大学计算机学院 南京 210046)¹ (南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)²

摘要 容迟网络作为移动自组网和传感器网络的最新发展形式,在智能公路、生物监测、卫星通信、乡村通信、个人信息交换等领域具有十分广阔的应用前景。容迟网络路由设计是一个富有挑战性和前景的新兴研究领域,首先介绍容迟网络路由技术的基础及其分类,然后对其中的多副本路由算法进行深入研究和比较,最后结合该领域当前研究现状,对未来研究容迟网络多副本路由算法进行总结和展望。

关键词 容迟网络,容断网络,机会网络,路由算法

中图分类号 TN915.04 **文献标识码** A

Research of Multi-copy Routing in Delay Tolerant Networks

XU Jia¹ WANG Ru-chuan¹ XU Jie² LIAO Jun²

(Computer Institute, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)¹

(Institute of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)²

Abstract Since Delay/Disruption Tolerant Networks(DTNs) have been proposed as the new evolution of MANET and WSN, the communication between nodes without end-to-end path is possible. DTNs have greate application prospects in the intelligent highway, biological monitoring, satellite communications, rural communication, personal information exchange, etc. Routing is a challenging and absorbing research field in DTNs. In this paper, we classified and analyzed the multi-copy routing, identified open research issues and intended to motivate new research and development in this area.

Keywords Delay tolerant network, Disruption tolerant network, Opportunistic network, Routing algorithm

1 引言

近年来,随着基础研究的逐步完善、硬件性能和制造工艺的不断提升,移动 Ad-hoc 网络(MANET)和无线传感器网络(WSN)应用正从起初的军事和抢险等个别领域转向范围更加广阔的民用领域,包括精确化农业、生物追踪、智能公路、医疗监测、校园内或会议中的文件分发、家庭自动化网络等。应用环境的日趋复杂以及无线节点自身的能量、信道稳定性、故障等因素,使得通常在研究该类网络时假设网络拓扑始终处于连通状态的条件不再成立。在这种限制下,传统的 MANET 和 WSN 路由就变得效率低下甚至根本无法运行。

容迟网络(Delay Tolerant Network, DTN)是一种在大部分时间内源节点和目标节点之间不存在完整路径而利用节点移动带来的接触机会实现通信的自组织网络。由于容迟网络中通信链路间歇性连接的特性,消息传递表现出大延迟和低发送率的特点。为此,容迟网络路由常通过复制方法产生多个消息副本,通过增加消息冗余降低发送延迟来提高发送成功率。目前,多副本路由技术已经成为容迟网络中一类重要的路由技术而被广泛研究。

2 容迟网络路由技术的研究背景

2.1 发展历史

容迟网络是 MANET 和 WSN 的一种重要发展形式。在容迟网络中,并不假设两个希望通信的节点间存在完整的路径,消息通常在网络中暂存以等待到达目的节点的路径出现。容迟网络中的许多概念最初来源于 1998 年美国国防部高等研究计划局 DARPA 支持的星际互联网计划(IPN)^[1,2]。在这种深度空间中,通信特性可描述为高传播延迟、低数据率、由于固定轨道而产生的间歇性连接、非对称高误码率链路以及低带宽。在这种条件下,传统的 TCP/IP 协议簇将简单丢弃找不到目的的数据包,如果产生大量的丢包,将最终终止会话。因此,需要在传输层上增加一个拥层以支持端到端通信,这种新颖的面向消息的覆盖层体系结构逐渐被各国学者关注。2002 年因特网研究任务组(IRTF)成立了延迟容忍网络研究组(DTNRG)^[3],将该体系结构扩展为连接高度异类网络的通用结构并研究该体系结构和相应协议的实现。之后,国外许多研究机构开始对 DTN 体系结构进行研究。近年来,国内的相关研究机构也开始关注并研究 DTN 这种新型的网

到稿日期:2010-09-25 返修日期:2010-12-13 本文受国家自然科学基金(60973139),江苏省高校自然科学基金项目(10KJB520014),南京邮电大学引进人才项目(NY210077)资助。

徐佳(1980-),男,博士,讲师,主要研究方向为容迟网络, E-mail: xujia@njupt.edu.cn; 王汝传(1943-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为无线传感器网络; 徐杰(1980-),男,博士生,主要研究方向为容迟网络; 廖俊(1976-),男,博士生,讲师,主要研究方向为移动自组织网络。

络体系结构,樊等人对 DTN 的应用背景、体系结构、关键技术、开放问题以及未来的发展方向和应用前景进行了系统的分析和阐述^[4]。张等人对采用交替休眠模式的部分连接网络的可用性进行了建模研究^[5],研究结果对无线自组织网络协议选型、网络协议的优化和网络部署具有指导意义。胡等人对 DTN 安全问题进行了深入分析,并对解决这些问题的安全机制的最新研究成果进行了分类与评述^[6]。

2.2 容迟网络路由设计基础

容迟网络中的路由设计是一个具有挑战性的课题,其难点在于:(1)容迟网络中也许并不存在到目的的路径,这使得传统的基于完整路径存在假设的 MANET 和 WSN 路由协议无法适用于容迟网络;(2)在一般的应用背景下,网络拓扑信息无法获得;(3)MANET 和 WSN 中的限制因素在容迟网络中同样存在,如移动性、受限的处理能力、存储能力、能量和带宽。针对容迟网络的特点,容迟网络中的数据转发依赖于节点间的接触机会,采用异步传输的方式最终将数据发送给目的节点。这种数据转发的方式实际上是将传统的存储转发模式改为存储等待转发或存储中继转发(SCF)模式。

在评价容迟网络路由协议性能时,通常重点考虑以下 3 个方面:

(1)发送成功率。相对传统网络,容迟网络的消息发送成功率较低,这是因为:①容迟网络中的通信链路不稳定;②传输延迟大,导致缓冲队列满而被丢弃;③节点间的“接触”带有机会性,消息的转发或复制并不能保证成功达到目的节点。因此,消息的发送成功率在容迟网络中是普遍追求的目标。

(2)端到端传输时延。尽管容迟网络支持大延迟的数据传输,但降低传输时延在大部分应用中依然十分重要。如校园网或乡村网的电子通告、大型公园的短期气象信息、精确农业的数据反馈等时效性应用,都要求在一定时间内完成数据传送。另一方面,容迟网作为一种重要的移动接入技术,能够提供可接受的电子邮件、Web 访问等服务。因此,传输时延是评价路由算法性能的重要指标。

(3)资源有效性。容迟网通常被认为是资源敏感型网络,这些网络资源包括:能量、缓存容量、带宽等。消息的转发或复制次数通常被用来评估资源消耗水平。

2.3 容迟网络路由算法分类

DTN 路由技术,从不同角度可分为不同种类,按照是否有基础设施支持,可以分为基础设施支持路由和无基础设施支持路由;从节点移动模型的角度,可以分为确定性路由和机会主义路由;根据消息的副本数量,可以分为单副本路由和多副本路由。

单副本路由由逐跳地转发消息,任何时刻,网络中仅有一个节点携带该消息副本。单副本路由需要以提高传输时延或降低消息发送率为代价,因为消息中继者并不能保证能成功地或者快速地将消息传输到目的节点。另外,单副本路由需要额外的存储资源和计算代价以跟踪、计算和维护到网络中每个潜在目的节点的效用信息。

在多副本路由中,每当节点间接触时就复制(可能是以一定概率复制或部分复制)消息到对方节点,故网络中存在多个节点携带该消息的副本。多副本路由技术以增加资源消耗为代价,提高消息发送率,降低传输时延。多副本路由技术在密集网络或高移动性网络中的表现明显好于其它类型的路由技

术,因为在这类网络中普遍存在的节点间接触机会有利于消息扩散。

3 典型的多副本路由技术

3.1 基于分发的路由

基于分发的路由也称为基于洪泛的路由,通过全网络的扩散将消息传播到目的节点。在没有到达目的的可能路径和下一跳信息的情况下,消息只能被发送到网络中的任意地方。通过节点间的接触,消息将最终到达目的节点。基于分发的路由技术在密集网络或高移动性网络中的表现明显好于其它类型的路由技术,因为在这类网络中普遍存在的节点间接触机会有利于消息扩散。基于分发的路由协议能保证最小的时延,但它们通常是资源饥渴型的(包括内存占用和带宽使用),这往往会导致能量消耗较高和扩展性不佳。

传染路由(Epidemic Routing)^[7]是最早提出的 DTN 路由协议,消息以类似于疾病或病毒的对方式(pair-wise)接触在网络中扩散。任何时候当网络中的某两个节点进行接触时,就发生一次反熵会话(anti-entropy session)进行消息交换。传染路由能快速、大范围地扩散消息,从而取得最佳的消息发送率和消息时延,同时传染路由需要消耗大量带宽、内存和能量等网络资源。

约束洪泛(Controlled Flooding)^[8]对传染路由的洪泛机制进行了改进,在增加少量时延的基础上,节约了大量网络资源。约束洪泛的改进主要在以下 3 个方面:①在节点中设置了灯塔间隔、成功转发次数和重传等待时间这 3 个参数,以此来刻画节点的转发意愿;②在消息头中增加消息最大转发跳数和最大转发时间,进一步约束消息在网络中的生存时间;③目的节点成功接收到消息后,发送“被动治愈”消息之前的转发节点进行对该消息的免疫,这样就避免了不必要的未来的重复传输。

移动中继路由协议(MRP)^[9]针对时延容忍型应用,综合已有的 Ad-hoc 路由技术,提出了基于中继的路由方案。该方案在传统的多跳 IP 路由层上设计了一个 MRP 层,用于管理使用传统 Ad-hoc 路由协议无法进行路由(可能由高移动性、能量衰减或稀疏拓扑造成)的消息。MRP 根据应用设置数据包的类型,时延容忍型或时延敏感型,并设置两个参数 d 和 h 分别代表时延容忍型数据包的 IP 路由跳数上限和 MRP 中继上限。如图 1 所示,当路由层接收到一个无法路由的数据包时,首先将该数据包送给 MRP 层,MRP 层根据一定规则将该数据包存储或发送给直接邻居,直到到达目的节点的跳数小于 d 时再将数据包送回路由层。MRP 实际上是传统 Ad-hoc 路由方式与随机分发的结合,将时延容忍型数据包仅转发给直接邻居的方式限制了数据包的副本数量,有效减少了带宽和存储空间占用。

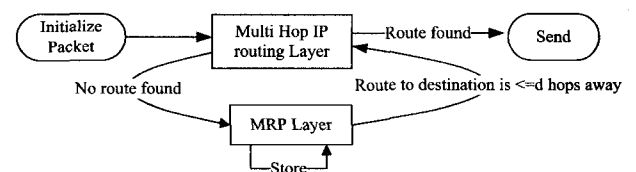


图 1 MRP 与传统 Ad-hoc 网络路由的结合

喷射和等待路由(Spray and Wait)^[10]是多副本路由和单副本路由的一种折中,它结合了传染路由的快速性和直接传

输的简单性和简洁性。该路由算法由喷射阶段和等待阶段构成,在喷射阶段采用类似传染路由的方式将消息扩散成 L 个副本,在等待阶段副本将只被允许直接转发给目的节点。喷射阶段可以不同的方式执行,文献[10]提出了一种时延最佳的二进制喷射方式,该方式具备平衡二叉树的性质,能在最短时间内扩散出 L 个消息副本。喷射和等待路由具有与传染路由接近的时延性能,却能降低资源消耗,具有较强的可扩展性。

喷射和等待路由存在一些改进算法。喷射和焦点路由(Spray and Focus)^[11]将等待阶段的直接传输策略改为基于接触历史效用的单副本路由策略,同时设置了效用传递机制以提高接触历史信息的效率。喷射和焦点路由是传染路由和单副本效用路由的结合体,能在稀疏的或低移动性的间歇性连接网络中获得比喷射和等待路由更佳的发送率和延迟性能,但喷射和焦点路由并没有给出具体的效用获得和计算方法,仅是一个概念上的路由策略。文献[12]研究了基于效用的喷射方法,提出了3种可能的效用函数及其计算方法:①最近遇见目的优先(LSF);②最高移动性优先(MMF);③最高社会性优先(MSF)。实验证明,基于效用的喷射比简单的最早遇见的喷射^[10]在延迟和发送率性能上有所提高。但文献[12]并没有给出这些效用函数之间的比较。文献[13]提出了一种自适应分布式喷射机制(AMR),二进制喷射树的深度由各中继节点动态决定。主要思想是建立延迟与喷射树深度的映射关系,中继节点将继续执行喷射过程,直到根据当前喷射树的深度计算出的估计延迟小于给定的应用层延迟要求。AMR能自适应各种移动性的间歇性连接 Ad-hoc 网络,在满足延迟约束条件下获得最小的流量负载。事实上,除喷射树的深度外,接触持续时间、信噪比、连接性等都将影响消息延迟,对于后两者,文献[13]并没考虑。ASSR(Adaptive Seed Spray Routing)^[14]针对源喷射路由在动态网络中自适应能力不强的问题,利用具备最新网络知识的中继节点完成副本数量的动态计算和复制,以达到时延和路由代价的平衡,但并没有考虑带宽和存储的限制。文献[15]提出了一类自适应喷射路由策略,并从路由代价、副本冗余度以及期望延迟3个方面给出了理论上的分析。

文献[16,17]分别对单副本 ICMN 路由和多副本 ICMN 路由在理想情况下的期望时延做了理论上的分析,这些分析对研究各类路由的性能有一定指导意义,但其并没有考虑到各种运动模型的差异以及带宽和存储能力的限制。

文献[18]提出了一种无灯塔地理路由(LAROD),LAROD使用一种贪婪受控广播发送消息^[19],发送者将消息广播到一个圆形区域内,该区域内的节点采用同样的方式继续广播该消息,发送者在规定时间内如果没有侦听到该消息的广播,就重新发起一次广播。LAROD减少了周期性灯塔消息对能量和带宽的消耗,能获得和传染路由接近的发送率。但在极度稀疏的网络中,这种贪婪的广播消息机制会带来延迟的增加。另外,LAROD需要地理信息支持。

Natasa 等人在对波兰华沙市的出租车运动模式进行追踪研究后发现,现实环境下的无线网络节点通常在某些局部范围内的密度远大于平均密度,从而形成以集中点 CP 为单位的岛状分割网络^[20]。Natasa 等人提出了岛状分割网络移动模型,其利用协作图发现 COGRAD 使每个节点掌握 CP 图,通过执行岛屿希望算法 IH 在 CP 之间转发数据。IH 能

保证有且仅有一个信息副本到达希望 CP,这有利于在保证消息发送率的同时最大限度降低资源消耗。IH 能在不需要任何全局网络拓扑信息和较少的传输次数的基础上获得与洪泛算法接近的端到端时延。IH 还有许多遗留问题需要研究,如对不稳定 CP 的处理方式;节点集体移动将会对 COGRAD 产生影响,进而得到错误的网络拓扑;在 CP 之间进行消息转发的节点互相通信问题等。

TAROT (Trajectory-Assisted ROuTing)^[21]通过实时检测和抽象节点的移动轨迹进行路由决策。TAROT 使用两个核心算法:路径检测(Path Detection, PD)和路由决定引擎(Routing Decision Engine, RDE)。路径检测算法将节点当前位置信息实时地记录到路径库(path library)中,并通过一些特定的指标将节点的当前移动划分为路径创造(PATH-CREATION)模式和路径跟随(PATH-FOLLOWING)模式。当节点发生接触时,如果接收节点当前为路径创造模式,则路由决定引擎将执行传染复制;如果接收节点未来的位置比发送节点更接近目的节点,则将对应的消息复制到接收节点,否则什么也不做。TAROT 实际上是一种受控的传染路由,以增加少量发送时延为代价降低负载。另一方面,TAROT 不要求节点存在固有的移动模式,而是通过路径检测算法不断总结和提取移动行为特征,因此更加适合实际的 DTN 应用场景,如人类社会、公共交通。然而 TAROT 的路径检测算法需要频繁地记录节点的位置信息,这对节点的能量和存储空间是一种挑战。

3.2 基于概率的路由

基于概率的路由算法按照预先估计的概率进行消息复制,这类算法通常需要在每个节点中计算出概率值,消息只被复制到概率值较大的节点。通过这种方式提高消息复制的效率,降低网络资源消耗。

MV 路由^[22-24]通过学习节点会见和访问地理网格的频率,按照发送概率进行消息复制,利用节点运动模式提高消息发送效率。当两节点相遇时,节点首先将自身产生的消息保留,然后将发送概率小于对方的消息删除,最后在余下的消息中选取具有较大发送概率(通过某个消息到达目的网格的概率值决定)的前 n 个消息进行保留。MV 路由考虑了运动模式对消息转发的有效作用,在网络中加入一种沿预先设计的路径运动的移动机器人。然而,计算移动机器人的最优路径已经被证明是 NP 完全问题。MV 路由通过机器人控制理论设计出多目标控制器系统以寻找到次优路径。仿真实验证明: MV 路由优于基于 FIFO 队列的路由方法,拥有较低的消息时延,移动机器人的加入提高了消息发送率。在负载增加的时候, MV 路由表现出较好的适应性。

文献[25]提出了基于概率的预言者路由由协议 PROPHET。该协议使每个节点都保持一张到各目的节点的发送预言表,发送预言考虑了历史相遇信息和老化信息。当节点以对方方式相遇时,仅当对方的发送预言高于自己时,对应的消息才会被发送。PROPHET 具有比传染路由更高的发送成功率,并且大大降低了负载。

3.3 基于优先权的路由

基于优先权的路由将消息按照某种效用或效用函数确定优先复制权,具有高优先复制权的消息在节点接触时被优先复制。优先权路由策略有助于从用户级或者系统级的角度优化网络资源的使用,同时也可避免大数据块“部分”传输的问

题。

电子科技大学的研究者提出了两个基于传输概率的多副本数据传输机制:基于相对距离感知的动态数据传输策略 RDAD(Relative Distance-aware Datadelivery Scheme)^[26]和基于选择复制的动态数据传输策略 SRAD(Selective Replication-based Adaptive Data Delivery Scheme)^[27],它们均针对延迟容忍移动无线传感器网络(Delay Tolerant Mobile Sensor Network, DTMSN)。

RDAD 采用传感器节点到汇聚点(sink node)的相对距离(通过估计加权平均信号强度得到)来计算节点传输概率的大小,并以此作为消息(message)传输时选择下一跳的依据。节点按照先大后小的顺序将消息依次复制给那些传输概率大于自身的邻居节点。为优化复本管理, RDAD 引入消息的生存时间 ST(Survival Time)和消息最大复制数 MR(Maximal Replication)决定队列中消息传递的优先顺序和丢弃原则。这种队列管理机制以限制副本数量达到降低能耗的目的。

SRAD 的思想和 RDAD 类似,其传输概率 P_i 由以下规则计算得到:(1)首先,节点 i 判断此刻自己所在的位置,若发现自己位于汇聚点的通信范围内,则表明此时可以直接与汇聚点发生通信,置 $P_i=1$ 。(2)查看节点 i 的当前位置和这次运动的目的地 D 的连线是否与汇聚点的通信范围相交(线段穿越圆),若相交,则置 $P_i=1$ 。(3)若上述两个条件均不满足,则 $P_i = \frac{2\arcsin(R/d)}{360}$,其中 R 为节点传输半径, d 为当前目的地 D 与汇聚点的距离。此外,基于消息生存时间的队列管理机制被引入到 SRAD 中。

与现有的几种 DTMSN 数据传输算法相比, RDAD 和 SRAD 能够以较低的数据传输能耗和传输延迟获得较高的数据传输成功率,并且具有相对较长的网络寿命。但 RDAD 的假设较强,如要求所有传感器节点的运动规律符合 Random Waypoint 运动模型;汇聚点是具备无限能量的远距离传输设备;网络中仅有一个汇聚点,且位置固定。SRAD 则要求更加严格的应用条件,如每个节点需要 GPS 的位置服务支持,每个节点需要掌握目的节点信息。因此,需要进一步的工作才能使得 RDAD 和 SRAD 更具有实际意义。

ORWAR (Opportunistic Routing with Window-Aware Replication)^[28]是一种资源有效的多副本路由算法。ORWAR 的主要创新是:(1)消息按照比特效用确定复制的优先次序;(2)当消息队列满时,最低比特效用的消息将首先被删除;(3)消息到达目的的信息通过接触机会传播,该消息将在各节点的消息队列中删除;(4)根据预测到的节点间接触时间,复制合理大小的消息块,避免部分传输现象。ORWAR 本质上是对喷雾等待的优化,从系统角度考虑资源的有效利用问题,通过引入队列管理机制和复制控制机制提高消息发送率,降低网络负载。ORWAR 采用比特效用作为复制参数,体现了系统级优化的明显特征。

最大概率路由协议(MaxProp)^[29]的主要思想是利用路径的发送概率对缓冲中的消息区分优先级,结合缓冲管理机制以提高发送率和降低时延。MaxProp 将整个网络看成为一个有权图,边上的权值为节点的遇见概率。设 S 为总节点数。 f_{ij} 为节点 i 和节点 j 间的遇见概率,假设各节点间的初始遇见概率相等,均为 $1/(|S|-1)$,当任一节点相遇时, f_{ij} 的值增加 1,然后在节点中进行归一化处理。那么路径 i 到目

的 d 的发送概率表示为: $c(i, i+1, \dots, d) = \prod_{x=i}^{d-1} [1 - (f_{x+1}^x)]$ 。

除路径发送概率以外, MaxProp 引入了一些辅助机制以进一步提高发送率和降低时延,这些机制包括:(1)发送给邻居的消息具有最高优先级;(2)路由信息通过对方式传递和更新;(3)除了源和目的,已发送消息的确认将被广播到全网,这有助于清除老消息占用的缓存空间;(4)对于从未在网络中发送的消息,将给予一定的发送机会。对缓冲根据跳数分为两部分,跳数小的消息具有高优先级(见图 2);(5)节点不发送已经发送过的消息。

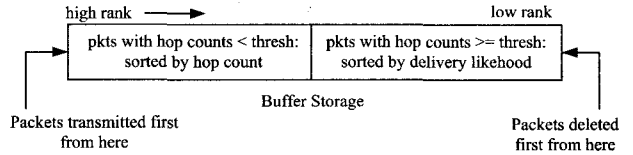


图 2 MaxProp 缓冲管理机制

3.4 基于编码的路由

编码路由将消息拆分成多个数据分片,各数据分片被独立地传输,目的节点只要收集到一定数量的数据分片就可以重组出完整的消息。

擦除编码路由(Erasure-coding Routing)^[30]在源节点使用某种网络编码方法(如里德编码和旋风编码^[31])将长度为 M 的消息划分为 $M * r/b$ 个编码块,其中 b 为编码块的长度, r 为复制因子。源节点将这些编码块分发给 $k * r$ 个中继节点, k 为常量。理论上,对于特定编码算法给定的微小常量 ϵ ,目标节点仅需要 $(1+\epsilon) * M/b$ 个编码块用于译码。忽略微小常量 ϵ ,那么目标节点需要 M/b 个编码块(即总编码块数量的 $1/r$)来重构消息。擦除编码路由主要有以下两个突出的优点:①目标节点仅需要 M/b 个编码块来重构消息,增强了数据发送的可靠性和鲁棒性。②对于同一个消息,在复制总字节数相同的情况下,中继节点数为基于复制的路由方法的 k 倍,这有助于提高消息发送率和降低端到端时延。DTNSIM^[32]上的仿真结果表明,擦除编码路由具有较好的可扩展性,相比基于历史的路由方法具有较小的时延。

台湾科学院 Chen 等人对擦除编码路由进行了改进,将基于复制的路由方法和基于编码的路由相结合,提出了容迟网络混合路由方法 H-EC(Hybrid Erasure Coding)^[33]。H-EC 结合复制路由的性能优势和编码路由的鲁棒性,使得网络在连通性极端贫乏和连通性较好的情况下都能高效地发送数据。H-EC 的主要思想是在节点间的接触时间内传输尽量多的连续编码块,使数据相对集中在某个中继节点中。在连通性较好的网络中,这种方法可以用来降低发送时延。改进后的擦除编码方法具有和原来相同的中继节点数量,但编码块的分布变的相对集中。仿真表明:H-EC 能在各种网络场景中保持很高的发送时延和发送率,适应能力大大增强。

在网络编码路由(Network Coding Routing)^[34]中,节点采用网络编码方法将来自源节点或其它中间节点的数据包进行合并后一起发送出去以减少通信代价,通过在全网分发,将合并后的数据包最终转发到目的节点,最后在目的节点执行译码过程。假设在如图 3 所示的 3 节点网络中,节点 A 有数据包 a 要发送给节点 c ,节点 C 有数据包 c 要给节点 A,它们之间需要通过中间节点 B 中继。因此,节点 A 和 B 首先将消

息 a 和 c 转发给节点 B , 节点 B 这时候并不分别转发 a 和 c , 而是将仅广播一个包含 $a \oplus c$ 的数据包 m , 节点 A 和 C 收到 m 后可以很容易提取出想要的数据包。网络编码路由的一个明显的优势就是大大减少了通信负载, 且在高丢包率和稀疏网络中均有良好的发送成功率。

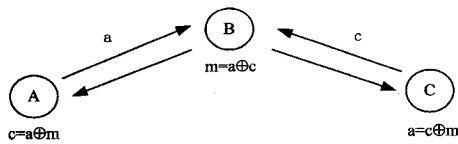


图3 网络编码的例子

多伦多大学的 Lin 等人提出了一种随机分析模型对网络编码传染路由的性能进行了研究^[35]。分析结果表明: 网络编码路由在网络带宽和节点缓冲受限的情况下要优于简单的基于分发的路由。

4 分析与比较

上述路由算法都有着不同的优化目标, 使用的路由策略也各不相同, 主要体现在评估转发概率的方法、转发节点的数量以及内存管理方式等方面。表 1 列出了具有代表性的路由算法在以上方面的比较。

表 1 典型多副本路由算法比较

Protocol	Estimation forwarding prob.	Number of relay	Buffer management	Remarks
Epidemic	no	Flooding based	no	First work
MRP	no	Flooding based	Remove least recent	integrate with DSDV
MV	probability of delivery in h hops to destination	Flooding based	delete those packets other nodes having higher probability	Infinite buffer for own bundle and finite buffer for others'
Spray and Wait	No	defined by spray phase	no	integrate with multi-copy and singer-copy routing
Erasure-Coding	no	Flooding based	no	Source enlarge the packets to be sent
Network Coding	no	Combine and Flooding	no	Decrease the transmissions
PROPHET	Contact and ageing	nodes with higher delivery predictability	no	
MaxProp	Contact history	Determined by delivery probability	Priority based	

总体上来看, 多副本路由在端到端延迟和发送率方面性能较优, 并且对网络知识的要求低, 但也存在着网络资源消耗大的问题。一些多副本路由算法通过构造复制概率或优先权控制副本数量, 取得了较好的结果。

结束语 容迟网络作为 MANET 和 WSN 最新的发展形式, 能够在各种复杂的和受限的条件下实现节点间通信。更低的部署要求、更强大的适应能力, 使得容迟网络的应用范围比 MANET 和 WSN 更为广阔。容迟网络将信息的收集与供给在空间和时间上最大程度地延伸, 在全球互联网络潮流中将占有重要地位。以上对目前典型的容迟网络多副本路由算法做了介绍, 总结了该领域的最新研究进展, 指出了存在的问题和进一步的研究趋势。

尽管目前国内外已经产生了一些积极有效的成果, 但总体来讲, 多副本路由技术的研究工作尚处于初步阶段, 一些基本问题还需要进一步的研究, 包括以下方面:

(1) 容迟网络的实际应用。目前的各种路由算法均针对不同的应用设想, 很难判断某种路由策略优劣。因此, 建立容迟网络的实际应用, 获得真实的流量模型、运动模式以及实际的路由需求才能评判各种协议的性能并明确改进方向。

(2) 效用函数的构建。在基于概率和优先权的路由中, 均需要以特定的优化目标或者是多个优化目标构成的效用函数作为确定概率和优先级的依据。从多副本路由技术的特点可知, 采用该路由技术的容迟网络一般对消息的端到端延迟和发送成功率有较高要求。效用函数的确定和效用知识的更新是需要研究的关键问题。

(3) 控制消息副本数量的方法。网络中存在的消息副本数直接关系到路由性能和资源消耗水平, 这需要两者的平衡。系统研究用户服务质量、网络资源预测、最优化路由性能分析

等因素之间的关系是处理该问题的关键。

(4) 处理“消息风暴”的机制。多副本路由中的消息被多次复制, 网络资源有可能被这些消息副本大量消耗, 从而造成路由性能急剧降低。目前路由算法中主要考虑防止“消息风暴”的方法, 如控制复制数量, 有选择性的复制, 消除已成功被路由的消息等。但如何处理已经泛滥的消息副本却很少提及, 缺少处理该问题的被动实时响应机制。

(5) 缓冲队列调度机制。在大数据块、大延迟的背景下, 队列管理在容迟网络路由中显得尤为重要, 主要包括: 消息的丢弃处理、优先级队列的构建和管理、基于各种先验知识(包括移动模式、效用信息、跨层信息)的队列调度机制等。

(6) 与传统的 MANET 以及 WSN 路由的协同。如果容迟网络中存在较大范围的连通区域, 或者网络有些时候是完全连通的, 单一地使用多副本路由并不能得到高的效率, 和传统路由协同工作是一个可行的方案。这里重点要考虑网络拓扑如何感知以及协议栈如何设计的问题。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Akan O, Chen C, et al. Interplanetary internet: state-of-the-art and research challenges [J]. Computer Networks, 2003, 43(2): 75-112
- [2] Scott B, Adrian H, Leigh T, et al. Delay-Tolerant Networking: An Approach to Interplanetary Internet [J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(6): 128-136
- [3] Fall K, Farrell S. Delay Tolerant Networking Research Group [EP/OL]. <http://www.dtnrg.org/wiki/Home>, 2010-09-24
- [4] 樊秀梅, 单志广, 张宝贤, 等. 容迟网络体系结构及其关键技术研究 [J]. 电子学报, 2008, 36(1): 161-170
- [5] 张天乐, 李忠诚, 刘敏. 无线网络部分连接可用性模型研究 [J].

- 计算机学报,2007,30(4):505-513
- [6] 胡乔林,苏金树,赵宝康,等. 延迟/中断容忍网络安全机制综述[J]. 计算机科学,2009,36(8):8-11
- [7] Vahdat, Becker D. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks[R]. CS-2000-06. Durham; Department of Computer Science, Duke University, 2000
- [8] Harras K, Almeroth K, Belding-Royer E. Delay Tolerant Mobile Networks (DTMNs): Controlled Flooding Schemes in Sparse Mobile Networks [C] // IFIP Networking. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 3462, Waterloo, Canada, May 2005: 1180-1192
- [9] Nain D, Petigara N, Balakrishnan H. Integrated Routing and Storage for Messaging Applications in Mobile Ad-hoc Networks [J]. Mob. Netw. Appl., 2004,9(6):595-604
- [10] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C S. Spray and Wait: An Efficient Routing Scheme for Intermittently Connected Mobile Networks[C] // Proceedings of the ACM SIGCOMM 2005 Workshop on delay tolerant networks. Philadelphia, PA, USA: ACM, August 2005:252-259
- [11] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C. Spray and Focus: Efficient Mobility-Assisted Routing for Heterogeneous and Correlated Mobility[C] // Proceedings of Fifth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops. White Plains, NY; IEEE, March 2007:79-85
- [12] Spyropoulos T, Turletti T, Obratzka K. Utility-based Message Replication for Intermittently Connected Heterogeneous Wireless Networks [C] // IEEE International Symposium on a In World of Wireless Mobile and Multimedia Networks. Espoo, Finland; IEEE, 2007:1-6
- [13] Li Zhuo-qun, Sun Ling-fen, Emmanuel C I. Adaptive Multi-Copy Routing for Intermittently Connected Mobile Ad-hoc Networks [C] // Sixth IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Networks. San Francisco, CA; IEEE, 2005:183-189
- [14] 徐佳, 孙力娟, 王汝传, 等. 机会网络中基于种子喷雾的自适应路由协议[J]. 电子学报, 2010, 38(10):2315-2321
- [15] 徐佳, 李千目, 张宏, 等. 机会网络中的自适应喷雾路由及其性能评估[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(9):1622-1632
- [16] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C. Efficient Routing in Intermittently Connected Mobile Networks: The Single-copy Case[J]. ACM/IEEE journal of Transactions on Networking, 2008,16(1):63-76
- [17] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C. Efficient Routing in Intermittently Connected Mobile Networks: The Multi-copy Case[J]. ACM/IEEE journal of Transactions on Networking, 2008,16(1):77-90
- [18] Kuiper E, Nadjm-Tehrani S. Geographical Routing in Intermittently Connected Ad-hoc Networks [C] // Proceedings of the 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications-Workshops. Okinawa; IEEE Computer Society, March 2008:1690-1695
- [19] Heissenbüttel M, Braun T, Bernoulli T, et al. BLR: beacon-less routing algorithm for mobile ad hoc networks [J]. Computer communications, 2004, 27(11):1076-1086
- [20] Sarafijanovic Djukic N, Pidrkowski M, Grossglauser M. Island Hopping Efficient Mobility-Assisted Forwarding in Partitioned Networks [C] // 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad-hoc Communications and Networks. Reston, VA; IEEE, 2006:226-235
- [21] Bromage Matthew K, Koshimoto James T, Katia O. TAROT: Trajectory-Assisted Routing for Intermittently Connected Networks [C] // Proceedings of the 4th ACM Workshop on Challenged Networks. Beijing, China; ACM, 2009:9-17
- [22] Burns B, Brock O, Levine B N. MV Routing and capacity building in disruption tolerant networks [C] // 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM 2005. Miami, FL; IEEE, 2005:398-408
- [23] Burns B, Brock O, Levine B N. Autonomous Enhancement of Disruption Tolerant Networks [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando, FL; IEEE, 2006: 2105-2110
- [24] Burns B, Brock O, Levine B N. MORA routing and capacity building in disruption-tolerant networks [J]. Ad-hoc Networks, 2008,6(4):600-620
- [25] Lindgren, Doria A, Schelen O. Probabilistic routing in intermittently connected networks [J]. Mobile Computing and Communications Review, 2003,7(3):19-20
- [26] 许富龙, 刘明, 龚海刚, 等. 延迟容忍传感器网络基于相对距离的数据传输 [J]. 软件学报, 2010, 21(3):490-504
- [27] 朱金奇, 刘明, 龚海刚, 等. 延迟容忍移动传感器网络中基于选择复制的数据传输 [J]. 软件学报, 2009, 20(8):2227-2240
- [28] Gabriel S, Nadjm-Tehrani S. Adding Redundancy to Replication in Window-aware Delay-tolerant Routing [J]. Journal of Communications, 2010,5(2):117-129
- [29] Burgess J, Gallagher B, Jensen D, et al. Maxprop: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks [C] // Proceedings of IEEE INFOCOM 2006. Barcelona, Spain; IEEE, 2006:1-11
- [30] Wang Y, Jain S, Martonosi M, et al. Erasure Coding Based Routing for Opportunistic Networks [C] // Proceedings of the ACM SIGCOMM 2005 Workshop on delay tolerant networks. Philadelphia, PA; ACM, 2005:229-236
- [31] Mitzenmacher M. Digital Fountains: A Survey and Look Forward [C] // Information Theory Workshop. San Antonio, TX, United states; IEEE, 2004:271-276
- [32] Jain S, Fall K, Patra R. Routing in a Delay Tolerant Network [C] // ACM SIGCOMM 2004; Conference on Computer Communications. Portland, OR, United states; ACM, 2004:145-158
- [33] Chen L J, Yu C H, Sun T, et al. A hybrid routing approach for opportunistic networks [C] // Proceedings of ACM SIGCOMM 2006. Pisa, Italy; ACM, 2006:213-220
- [34] Widmer J, Le Boudec J. Network Coding for Efficient Communication in Extreme Networks [C] // Proceedings of the ACM SIGCOMM 2005 Workshop on Delay Tolerant Networks. Philadelphia, PA, USA; ACM, August 2005:284-291
- [35] Lin Y, Li B, Liang B. Stochastic analysis of network coding in epidemic routing [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(5):794-808