

# 容迟网络路由算法

肖明军      黄刘生

(中国科学技术大学计算机科学与技术学院    合肥    230027)

(中国科学技术大学苏州研究院    江苏苏州    215123)

(xiaomj@ustc.edu.cn)

## Delay-Tolerant Network Routing Algorithm

Xiao Mingjun and Huang Liusheng

(School of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

(Suzhou Institute for Advanced Study, University of Science and Technology of China, Suzhou, Jiangsu 215123)

**Abstract** Delay-tolerant networks (DTNs) are intermittently-connected networks that may suffer from frequent and long lasting disconnection due to various reasons such as mobility, power management, scheduling, etc. Representative delay tolerant networks include wireless sensor networks using scheduled intermittent connectivity, mobile ad hoc networks, satellite networks with periodic connectivity, village networks, wildlife tracking networks, and pocket switched networks, etc. Due to the broad application prospect, delay tolerant networks attract much attention. However, compared with traditional networks, there are no stable end-to-end delivery paths in delay-tolerant networks, and the routing problem is thus much more complicated. Most of the existing research work also focuses on this problem, and many delay-tolerant network routing algorithms are proposed. In this paper, the state of the art in these algorithms is summarized. At first, the evaluation criterion of performance is introduced. Secondly, different taxonomies for delay-tolerant network routing algorithms are presented. According to the routing strategy, all the algorithms can be categorized into the algorithms based on replication and the algorithms based on forwarding. According to the network model, the algorithms can be categorized into the algorithms based on active mobility model and the algorithms based on passive mobility model. Thirdly, the representative routing algorithms are described for each class of algorithms. Furthermore, the advantages and disadvantages of these algorithms are summarized. Finally, the future directions of research in this area are discussed.

**Key words** delay-tolerant network; disruption-tolerant network; MANET; opportunistic network; routing algorithm

**摘 要** 容迟网络泛指那些由于节点移动、能量管理、调度等原因而出现频繁中断、甚至长时间处于中断状态的一类网络。它涵盖了由于节点调度而处于间歇式连通的无线传感网络、移动 Ad hoc 网络、周期性连通的卫星网络、乡村网络、野生动物追踪网络以及个人设备交换网络等等,具有十分广阔的应用前景,引起了广泛的关注。与传统网络相比,容迟网络没有稳定的端到端传输路径,因而其路由问题更为复杂。已有的研究工作也主要集中于这一问题,并提出了许多的容迟网络路由算法。对这些算法的最新进展

收稿日期: 2008-07-28; 修回日期: 2009-05-07

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划基金项目(2006CB303006); 国家自然科学基金项目(60803009); 教育部高等学校博士学科

点专项科研基金项目(20070358075)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

进行了综述. 首先, 介绍了容迟网络路由算法的性能评价标准. 其次, 给出了容迟网络路由算法的分类方法. 按照路由策略来分, 容迟网络路由算法可以分为基于复制策略的算法和基于转发策略的算法. 按照网络模型来分, 容迟网络路由算法又可以分为面向主动移动模型的算法和面向被动移动模型的算法. 然后, 针对每一分类, 重点综述了其中具有代表性的一些容迟网络路由算法, 并总结了各算法的优缺点. 最后, 讨论了未来的研究方向.

关键词 容迟网络; 容断网络; 移动 Ad hoc 网络; 机会网络; 路由算法

中图法分类号 TP393

容迟网络或容断网络( dela /disruption-tolerant network, DTN), 是近年来无线网络研究领域备受关注的一个新兴概念, 泛指由于节点移动等原因而没有稳定的端到端传输路径、甚至大部分时间处于中断状态的一类网络<sup>[1-2]</sup>. 这一概念最早是由 K. Fall 在著名国际会议 SIGCOMM 2003 上提出来的<sup>[2]</sup>, 其应用涵盖了因特网以外的许多通信网络, 如星际网络、乡村网络、战争网络、野生动物监控与追踪网络、移动 Ad hoc 网络和无线传感器网络、PSN (pocket switched networks) 网络等<sup>[1]</sup>. 容迟网络的研究则是希望为这些网络在拓扑动态变化的情况下提供一定品质的网络服务, 被认为是实现“无处不在的网络”的一项关键技术, 具有重要的研究意义.

与传统网络相比, 容迟网络的拓扑动态变化, 节点间没有稳定的传输路径, 甚至可能在任意时刻都没有一条完整的传输通路, 使得那些依赖于稳定传输路径的传统 Ad hoc 网络路由机制难以发挥作用<sup>[3]</sup>. 因而, 在容迟网络中, 报文传输往往是以“存储-携带-转发”( store-carr-forward) 的方式完成的. 例如, 在图 1 所示的简单容迟网络中, 节点 0 和 5 之间虽然没有完整的传输通路, 仍然可以通过节点 2 和 4 以“存储-携带-转发”的方式实现报文传输.

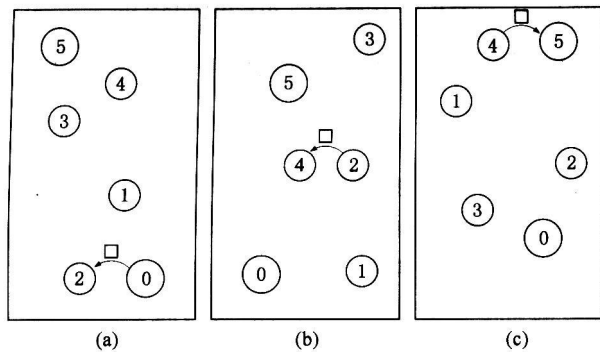


Fig. 1 The example of message deliver in DTN. (a)  $T=1:0 \rightarrow 2$ ; (b)  $T=2:2 \rightarrow 4$ ; and (c)  $T=3:4 \rightarrow 5$ .

图1 容迟网络报文传输示例. (a)  $T=1:0 \rightarrow 2$ ; (b)  $T=2:2 \rightarrow 4$ ; (c)  $T=3:4 \rightarrow 5$ .

路由问题是容迟网络研究的热点问题之一. 在“存储-携带-转发”的报文传输模式中, 容迟网络路由所需解决的主要问题是如何在网络拓扑随时间而动态变化的情况下确定合适的传输路径, 以便有效地将报文传送到目的地. 与传统静态网络相比, 容迟网络的路由选择需要考虑到网络拓扑是随时间而不断变化的. 在大多数应用中, 这种变化还具有不确定性, 这就使得制定合适的路由策略变得非常具有挑战性. 目前, 围绕着这一问题已展开了大量研究, 提出了许多的路由算法. 本文则对这些算法进行了综述, 并对未来的研究方向进行了展望.

## 1 容迟网络路由算法的性能评价与分类

### 1.1 容迟网络路由算法的性能评价

容迟网络路由算法往往以提高报文传输的成功概率, 降低传输延迟, 减少能量、缓存等资源的消耗为优化目标, 主要包括以下性能评价标准.

传输率( deliver ratio), 是指在给定时间内网络中成功传输到目的地的报文数量与所有源节点发出的不同报文的总数之比<sup>[4]</sup>. 在容迟网络中, 报文传输往往存在较大的延迟, 使得报文可能在生存期内无法传输到目的地而造成传输失败. 另外, 报文在传输过程中也可能会由于传输容量或节点缓存容量受限而被策略性地丢弃, 造成传输失败. 容迟网络中报文传输的失败率通常会明显地高于传统网络. 因而, 传输率被作为一个重要的性能指标来评价路由算法的可靠性.

传输延迟( latenc ), 指报文从源点被成功传输到目的地所需的时间<sup>[4]</sup>. 尽管容迟网络能够容忍报文传输存在一定的延迟, 但大多数的应用仍然强调传输的时效性. 而且, 传输延迟越小, 越会尽早地释放所占用的网络资源, 提高网络资源的利用率. 因而, 端到端传输延迟也是容迟网络路由算法的重要性能指标.

此外,网络资源的消耗也是评价路由算法性能的基本指标,包括能量代价、缓存容量代价等等。通常,可以采用网络中传输报文的副本数量来粗略地评估路由算法的资源消耗<sup>[4]</sup>。

## 1.2 容迟网络路由算法的分类

容迟网络路由算法的设计需要考虑网络拓扑的动态变化、通信链路容量、节点缓存容量等多种因素,针对不同的网络模型而采用不同的路由策略。根据这些路由策略、网络模型等,已有的算法可以有多种分类方法。与传统的Ad hoc网络或无线传感网络类似,容迟网络的路由算法首先可以分为单播、任意播和组播路由算法。由于目前任意播路由<sup>[5]</sup>和组播<sup>[6-8]</sup>路由的相关算法较少,因此,本文仅介绍单播路由算法的分类。

从网络模型的角度来看,容迟网络可以分为主动移动的容迟网络和被动移动的容迟网络<sup>[9]</sup>。在主动移动的容迟网络中,存在一些可以控制自身移动路线的节点,游走于相互分隔的网络节点或区域之间,以“存储-携带-转发”的方式协助网络传输报文。面向这一类容迟网络的路由算法则主要是为这些节点规划最优的移动路线。在被动移动的容迟网络中,节点不能控制自身的移动,而只能按照一定的移动模型进行移动。根据节点的移动模型,可以将这一类容迟网络的路由算法分为面向确定或半确定移动模型的路由算法和面向随机移动模型的路由算法<sup>[10]</sup>。面向确定移动模型的路由算法中,节点可以预知网络拓扑的动态变化,从而选择最优路径转发报文。面向随机移动模型的路由算法中,网络拓扑的变化往往具有随机性,节点通常采用复制的策略来转发报文。而面向半确定移动模型的路由算法则介于两者之间。

从路由策略的角度来看,容迟网络路由算法可以简单地分为复制策略的路由算法和转发策略的路由算法<sup>[4,11]</sup>。复制策略的路由算法以复制的方式转发报文,网络中有同一报文的多个副本在传输。转发策略的路由算法沿着最优路径逐跳地转发报文,网络中只有一个报文的副本在传输。目前,无论是基于复制策略的路由算法还是基于转发策略的路由算法,主要还是针对被动移动模型下的容迟网络路由问题提出来的。

## 2 典型的容迟网络路由算法

一般而言,容迟网络的路由算法可以按照路由

策略或移动模型进行分类。有些路由算法着重于描述算法的路由选择策略,主要包括复制策略的路由算法和转发策略的路由算法。而另一些路由算法则更侧重于从移动模型的角度出发来研究容迟网络的路由问题,主要包括面向主动移动模型的路由算法和面向被动移动模型的路由算法。下面将分别介绍其中的一些代表性算法,并对这些算法加以总结。

### 2.1 复制策略的路由算法

在复制策略的路由算法中,当节点间出现通信机会(在容迟网络中也被称为contact,即“联系”<sup>[12]</sup>)时以复制的方式转发报文。因而,网络中有同一报文的多个副本在传输。这种策略通过提高报文的冗余度来增加端到端传输的成功概率,降低传输延迟。这一类算法主要包括基于洪泛的路由算法、基于概率的路由算法、基于调度的路由算法和基于编码的路由算法等等。

#### 2.1.1 基于洪泛的路由算法

在基于洪泛的路由算法中,每当节点间出现“联系”时就向对方复制报文,并且通过限定报文的生命周期或网络中报文副本的数量来避免报文风暴。这类算法中,最具代表性的算法是传染病路由(epidemic routing)算法<sup>[12]</sup>和Sprague and Wait/Focus算法<sup>[13,14]</sup>。

传染病路由算法是由Vahdat和Becker提出来的,借用了同步复制数据库的技术来解决容迟网络的路由问题<sup>[12]</sup>。其基本思想就是相“联系”的节点间交换彼此缺少的报文,经过足够的报文交换后,每个非孤立的节点最终将收到所有的报文,从而实现了报文的端到端传输。在传染病路由算法中,每个报文都有一个全局唯一的标识,每个节点都以报文标识作为关键字建立自身存储报文的Hash索引,同时生成一个与该Hash索引表一一对应的概要向量(summary vector, SV),按位标示自身是否存有相应Hash表项所指的报文。当2个节点间出现“联系”时,首先交换各自的概要向量,从而获知自身没有而对方存有的报文,然后双方仅传送对方没有的报文。传染病路由算法的主要优势在于节点不需要了解网络拓扑变化的信息,而且该算法会最大化报文传输的成功率,但是该算法过度地复制报文,使得网络中存在大量的报文副本,消耗了大量的网络资源,而且还易于产生严重的资源竞争冲突,极大地降低网络性能,使得该算法的实用性较差。

Sprague and Wait算法<sup>[13]</sup>是由Sproopoulos等人提出来的,该算法事先限定网络中的报文副本数量,

只进行有限地复制传输,因而减少了因报文过度复制而造成的资源浪费和竞争冲突,提高了网络资源的利用率.这一算法主要包括报文“喷洒”(spra)和“等待”(wait)两个阶段.在第1阶段中,报文的源节点仅向网络中复制固定数量的副本,即喷洒报文.报文喷洒采用二元喷洒的方式,每当一个持有 $n$ 个同一报文副本的节点遇到另一个没有该报文的节点时,分配 $\lfloor n/2 \rfloor$ 个副本给后者,自身保留 $\lfloor n/2 \rfloor$ 个,直到仅持有1个副本时进入第2阶段.作者还证明了这种二元的报文喷洒方式能够使Spra-and-Wait算法获得最优的期望延迟.进入第2阶段的每个节点只持有该报文的单一副本,这些节点仅仅是等待,直至遇到报文传输的目标节点时,才将报文转发给该节点以完成整个传输过程.通过这种有限喷洒和等待的方式,该算法可以限定网络中同一报文的副本数量.Spra-and-Focus算法<sup>[14]</sup>则对Spra-and-Wait算法进行了改进,进入第2阶段的节点仍然可以转发报文,而不是简单的等待,报文则会被转发给传输成功率更高的节点.

此外,文献[15]针对容迟移动传感网络,研究了基于共享无线信息站模型(shared wireless infostation model, SWIM)的路由协议中所存在的延迟、能耗和存储之间的折中问题,并给出了一个基于局部最优树的报文分发方法,来限定网络中的副本数量.文献[16]则将简单计数协议用于容迟网络路由算法中,并提出了被称为中间免疫(intermediate immunity)的技术来限制报文副本的数量.

### 2.1.2 基于概率的路由算法

基于概率的路由算法,对报文传输的成功概率进行估算和比较,有选择性地复制报文.通过这种方式减少报文复制的盲目性,避免生成低效传输的副本,提高了网络资源的利用效率.代表性的算法主要包括Lindgren等人提出的PRoPHET算法<sup>[17]</sup>和Burns等人提出的MV路由算法<sup>[18]</sup>.

PRoPHET算法<sup>[17]</sup>定义了一个被称为传输预测值(deliver predictability)的指标来描述节点间成功传输的概率.与传染病路由算法相比,每当2个节点相遇时,它们除了要交换概要向量外,还需要交换传输预测值向量.基于交换所得的信息,每个节点更新各自的传输预测值向量.然后,节点对概要向量和传输预测值向量进行比较,只有在对方节点到目标节点的传输预测值大于自身到目标节点的传输预测值时,才向对方节点复制报文.

MV算法<sup>[18]</sup>则利用节点间的相遇概率来描述报文传输的成功概率.任意2节点间的相遇概率直接作为这对节点的传输概率,在此基础上通过递归的方式来计算多跳传输的成功概率.节点相遇时,交换各自的报文及其传输概率信息.通过比较,节点仅向传输概率更高的节点复制报文.

### 2.1.3 基于调度的路由算法

基于调度的路由算法首先为报文设定优先级,传输效率高的报文往往被赋予较高的优先级.每当出现“联系”或通信时机时,通过调度优先复制传输具有高优先级的报文.由于节点间的传输容量和节点自身的缓存容量有限,因而每次只有部分报文能够被复制传输,低优先级的报文则会由于长时间得不到通信时机而被丢弃.通过这种调度方式,丢弃低效传输的报文,提高网络资源的利用率.这一类的主要算法包括Burgess等人提出的MaxProp算法<sup>[19]</sup>和Balasubramanian等人提出的RAPID算法<sup>[20]</sup>.

MaxProp算法<sup>[19]</sup>采用增量平均化(incremental averaging)的方法来估算节点间成功传输报文的概率,并将报文传输失败的概率之和作为端到端传输路径的代价,基于传输代价来确定该报文的优先级.报文成功传输的概率越大,该报文的传输代价就越小,因而赋予较高的优先级,被优先复制转发;反之,如果报文的传输概率较小,则会被赋予较低的优先级,得不到转发机会,从而避免生成低效传输的报文副本,提高了网络资源的利用率.

RAPID算法<sup>[20]</sup>则将容迟网络的路由问题模型化一个效用驱动的资源分配问题.该算法假设节点间的相遇时间符合指数分布,采用分布式的算法来估算节点间报文传输延迟的期望值,并根据传输延迟定义了报文传输的效用函数,传输延迟较大的报文则具有较小的效用函数值.然后,根据报文的边际效用值按降序进行报文的复制转发. RAPID算法是一个具有明确优化目标的路由算法,并在一个由40辆公交车组成的容迟网络实验床上对其性能进行了有效验证.

### 2.1.4 基于编码的路由算法

基于编码的路由算法主要包括基于擦除码(erasure code)的路由算法<sup>[21-22]</sup>和基于网络编码(network coding)的路由算法<sup>[23]</sup>.这类算法基于编码的方法将报文拆分为数据块,通过多路径在网络中传输,目标节点只要收到一定数量的数据块就可以恢复出原报文.

文献[21-22]均提出了基于擦除码的路由算法.

如何将报文分块、复制、分配到多个传输路径才能最大化报文传输的成功率是基于擦除码的路由算法的关键性问题. 文献[21]对这一问题进行了形式化, 借用现代投资组合理论(modern portfolio theor)分别在伯努利路径传输模型和高斯路径传输模型下求解了该问题, 并提出了简单有效的算法, 能够获得最优的报文传输概率.

文献[23]则提出了基于网络编码的路由算法. 该算法在基于概率的路由算法的基础上, 引入线性网络编码技术来降低算法的代价. 通过仿真实验表明, 在一个稀疏部署的移动网络中, 特别是在节点具有较高的丢包率时, 引入网络编码技术后, 路由算法的性能提升尤为明显.

## 2.2 转发策略的路由算法

在转发策略的路由算法中, 节点根据所获得的有关网络拓扑动态变化的知识, 按照一定的优化目标选择一条最优传输路径, 报文沿着该路径逐跳地传输. 在报文的传输过程中, 节点不会对其进行复制. 因而, 网络中只有一个报文的副本在传输.

转发策略的容迟网络路由算法中, 具有代表性的算法是由Jain等人在文献[24]中提出的一系列算法, 包括FC(first contact), MED(minimum expected delay), ED(earliest deliver), EDLQ(earliest deliver with local queue), EDAQ(earliest deliver with all queue)和LP(linear program)共6个路由算法. 这些算法首先将容迟网络形式化为一个多图, 节点间的“联系”对应于多图的边. 然后, 基于该多图, 以降低传输延迟为优化目标, 选择最优的路径转发报文. 这些算法当中, 基于零知识输入的FC路由算法最为简单, 节点从最先出现的“联系”中随机地选择一个来转发报文, 因而性能最低且不能保证消息能够成功传递到目的地. MED路由算法基于网络中“联系”的摘要信息, 采用Dijkstra算法求解最优路由. ED路由算法则基于网络中所有“联系”信息, 采用改进的Dijkstra算法求解报文最早到达的最优路由. 而EDLQ和EDAQ路由算法则在ED路由算法的基础上分别引入了局部节点的缓存队列和全局的缓存队列信息, 进一步地优化性能. LP路由算法则进一步考虑了流量需求的信息, 将最优路径求解问题形式化为一个线性规划问题加以求解.

此外, 文献[25]提出了一个基于链接状态的路由协议, 首先采用传染病算法将链接状态信息洪泛到网络中各个节点, 然后利用这些链接状态信息作

路由决策. 文献[26]首先根据消息成功传输到目的地的概率定义了一个效用函数, 并提出了一个基于效用函数的路由机制. 文献[27]则考虑异质的容迟移动Ad hoc网络, 将网络容量分析转化为最大一致流问题, 并在此基础上提出了一个以传输容量最大为优化目标的渐进最优的节点调度和路由机制. 在文献[10]中, 作者假设容迟网络中的节点要么静止、要么有规律的运动, 针对这一类简单的容迟网络, 提出了一个可扩展的分层路由算法DHR.

## 2.3 面向主动移动模型的路由算法

在主动移动的容迟网络中, 存在一些通常被称为报文轮渡(message ferry)<sup>[28-30]</sup>或数据骡子(data mule)<sup>[31]</sup>的节点. 这些节点在报文的传输过程中起到“桥”的作用, 它们可以控制自身的移动行为, 按照一定的路线在相互分隔的网络节点或区域间进行移动, 以“存储-携带-转发”的方式协助网络传输报文. 面向主动移动模型的容迟网络路由算法则主要是为这些节点设计最优的移动路线.

这一类算法主要就是由美国佐治亚理工学院提出的一系列基于报文轮渡的路由算法<sup>[28-30]</sup>. 其中文献[28]针对只含有一个轮渡节点的网络, 提出了一系列的机制来控制该轮渡节点的移动路线, 协助报文传输. 文献[29]考虑含有多个轮渡节点的网络, 以满足流量需求且传输延迟最小为优化目标, 提出了计算轮渡节点最优移动路线的算法. 文献[30]则提出了一个被称为OPWP(optimized wa-point)的轮渡节点路由算法, 不需要轮渡节点与其他普通节点进行任何的在线合作即可确定其路由. 该算法首先确定了一个有序的路线(wa-point)集合和轮渡节点在每个路点处等待的时间, 然后采用启发式的策略设计了遍历这些路点的最短路径, 将其作为轮渡节点转发报文的路由.

## 2.4 面向被动移动模型的路由算法及相关研究

在被动移动的容迟网络中, 节点不能控制自身的移动路线, 而是按照既定的方式或移动模型进行移动. 一般而言, 面向被动移动模型的容迟网络路由算法主要包括2个阶段: 一是获取有关网络模型的知识, 特别是有关网络拓扑动态变化的信息; 二是基于所获得知识制定路由策略. 前面介绍的复制策略和转发策略的路由算法一般事先假定网络模型, 然后侧重于设计和提出一定的路由策略. 本小结则主要介绍一些基于移动模型的路由算法及相关研究. 这些研究更侧重于对网络中的节点移动、节点间相遇等规律进行分析、建模, 获取相关的模型及网络参数, 以便针对性地设计路由算法.

在文献[32]中, Dal 等人基于“社会网络(social network)具有小世界(small world)特性”这一基本思想,提出了基于社会网络分析技术的容迟网络路由算法 SimBet. 该算法采用社会网络领域内的分析技术,为网络中的节点定义了向心性和相似度属性的概念,通过计算和比较节点的向心性和相似度值来发现在网络中能够起到连通孤立区域的“桥”节点,在此基础上设计了 SimBet 路由算法. 文献[33]则针对 PSN 网络提出了一个基于社会网络的分布式路由算法 Bubble, 该算法主要利用具有高向心性的节点或与目标节点处于同一社区的节点来转发报文,提高报文转发的效率. 文献[34-35]首先提出了一个在高维欧氏空间下形式化节点移动模式的方法,称之为 Mob Space. 然后,利用该方法对实际的容迟网络进行建模,并在此基础上提出了基于 Mob Space 的路由算法. 而文献[36]则针对节点周期性地运动并以一定概率相遇的 DTN 网络提出了一个机会路由算法 RCM.

在容迟网络中,节点相遇的时间和概率等网络参数对于设计路由算法及其性能评估有着重要的指导作用. 为此,文献[37]首先从理论上计算了随机方向模型(random direction model, RDM)和随机路点模型(random wa point model, RWP)中节点相遇时间的期望值,然后提出了基于社区的移动模型,并计算了该移动模型下节点相遇时间的期望值,最后还分析了基于这些模型的路由算法的延迟上下界. 文献[38]则针对文献[39-41]中观察到的有关“随机移动模型中的节点相遇时间呈幂律(power law)分布,而不是传统所认为的指数分布”这一现象给出了理论分析,并证明了一项重要结论:在有界区域内,随机路点模型和随机走模型(random walk model, RWM)中节点相遇时间符合指数分布,而一旦去掉了这些模型中的边界限制,相遇时间则由指数分布变为了幂律分布. 除了对这些常用的模型进行理论分析外,还有对真实容迟网络实验数据进行建模分析的研究,如文献[42]以携带 WiFi 节点的公交车组成的容迟网络 UMass DieselNet 为实验床,研究分析了实际的实验记录,发现节点间相遇的次数虽然在总体上没有呈现出特定的模式,但在路由级别上表现出了周期性的规律.

## 2.5 小结

通过以上分别从路由策略和网络模型的角度对已有典型的容迟网络路由算法的介绍,可以得知这些算法都有各自的特点:

1) 从路由策略的角度来看,复制策略的路由算法往往不需要了解整个网络拓扑动态变化,对网络移动模型的依赖较少,适用的范围广. 但是,这些算法也存在着网络资源利用率低的问题. 而且,设计的路由策略大多只是定性优化某些性能指标,难以做到量化,特别是针对复杂的容迟网络来实现优化目标明确的路由算法还非常困难,需要深入的理论分析和研究. 而转发策略的路由算法往往需要对网络拓扑的动态变化有一定程度的了解,从而能够选择合适的路径转发报文,网络中没有冗余报文,网络资源利用率较高. 但是获取和更新有关网络拓扑动态变化的知识则会耗费大量的网络资源,而且如何以一种可扩展的方式去描述和发布网络拓扑变化的知识也是这类算法中的难题.

2) 从网络模型的角度来看,面向主动移动模型的路由算法能够利用节点的移动性协助网络中的报文传输. 一般情况下,这些的算法主要是在已知部分节点部署的情况下,通过节点间的协作来规划主动移动节点的移动路线,但如何通过深入的理论分析将算法的优化目标进行量化使其能够具备一定的服务质量,以及如何提高算法的可扩展性、鲁棒性、自适应性和智能性等还需要进一步的研究. 在面向被动移动模型的路由算法的研究方面,目前针对几个常用的随机移动模型已取得了一定的理论研究成果,对于分析路由算法的性能有着非常重要的指导作用. 但是由于真正面向实际应用的容迟网络往往不符合这些随机移动模型,因而需要对实际容迟网络中的节点移动数据进行分析、建模,而目前相关的研究还非常有限.

总体而言,容迟网络的路由算法虽已取得了一定的研究成果,但仍然处于初步阶段,特别是在理论研究及面向实际应用方面还有很大的研究空间,路由问题依旧是容迟网络的关键难点问题之一.

## 3 展 望

自国际互联网研究任务组(Internet Research Task Force, IRTF)成立容迟网络研究组(dela-tolerant networking research group, DTNRG)以来,特别是在许多实际应用项目<sup>[1]</sup>的支持下,容迟网络路由算法方面的研究取得了丰富的成果. 但是,容迟网络的研究总体上尚处于起步阶段,路由问题又

极具挑战性,因而还有许多的问题有待解决.通过对已有成果的分析和总结,我们认为将来可能的热点研究方向主要包括:1)路由算法性能评价的模型化和量化;2)复制策略和转发策略相结合的路由算法及相关理论研究;3)基于社会网络的容迟网络路由算法和相关的理论研究;4)针对实际容迟网络中的节点移动数据进行分析、建模,以及相关的理论和算法研究等.

## 参 考 文 献

- [1] Cerf V, Burleigh V, Hooke A, et al. Delay-tolerant networking architecture. [2007-06-01]. <http://tools.ietf.org/html/draft-irtf-dtnrg-arch-08>
- [2] Fall K. A delay-tolerant network architecture for challenged Internets [C] //Proc of the ACM SIGCOMM 2003. New York: ACM, 2003: 27-34
- [3] Abdulla M, Simon R. The impact of the mobility model on delay-tolerant networking performance analysis [C] //Proc of the 40th Annual Simulation Symposium (ANSS07). Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 177-184
- [4] Jones E P C, Ward P A S. Routing strategies for delay-tolerant networks [OL]. [2008-07-26]. <http://www.tct.hut.fi/opetus/s383151/articles/dtn-routing-survey.pdf>
- [5] Gong Y, Xiong Y, Zhang Q, et al. Anicast routing in delay-tolerant networks [C/OL] //Proc of the IEEE GLOBECOM 2006. Piscataway, NJ: IEEE, 2006 [2008-07-28]. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4151590&isnumber=4150630>
- [6] Zhao W, Ammar M, Zegura E. Multicasting in delay-tolerant networks: Semantic models and routing algorithms [C] //Proc of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking (WDTN 2005). New York: ACM, 2005: 268-275
- [7] Ye Q, Cheng L, Chuah M C, et al. OS-multicast: On-demand situation-aware multicasting in disruption-tolerant networks [C] //Proc of the IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2006). Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 96-100
- [8] Chen Y, Yang J, Zhao W, et al. Multicasting in sparse MANETs using message forwarding [C] //Proc of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2006). Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 691-696
- [9] Zhang Z. Routing in intermittently connected mobile ad hoc networks and delay-tolerant networks: Overview and challenges [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2006, 8(1): 24-37
- [10] Liu C, Wu J. Scalable routing in delay-tolerant networks [C] //Proc of the ACM MOBIHOC 2007. New York: ACM, 2007: 51-60
- [11] Xue J, Lu H, Shi L. DTN routing technique review [EB/OL]. Chinese Science Paper Online. [2008-05-20]. [http://www.paper.edu.cn/paper.php?serial\\_number=2007112407](http://www.paper.edu.cn/paper.php?serial_number=2007112407) (in Chinese)  
(薛静锋, 陆慧梅, 石琳. DTN 路由技术研究综述[EB/OL]. 中国科技论文在线. [2008-05-20]. [http://www.paper.edu.cn/paper.php?serial\\_number=2007112407](http://www.paper.edu.cn/paper.php?serial_number=2007112407))
- [12] Vahdat A, Becker D. Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks, CS 2000-06 [R]. Durham, NC: Duke University, 2000
- [13] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C S. Spray and wait: An efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks [C] //Proc of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking (WDTN 2005). New York: ACM, 2005: 252-259
- [14] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C. Spray and focus: Efficient mobility-assisted routing for heterogeneous and correlated mobility [C] //Proc of the IEEE PerCom. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 79-85
- [15] Small T, Haas Z J. Resource and performance tradeoffs in delay-tolerant wireless networks [C] //Proc of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking (WDTN 2005). New York: ACM, 2005: 260-267
- [16] Walker B D, Glenn J K, Clanc T C. Analysis of simple counting protocols for delay-tolerant networks [C] //Proc of the ACM MOBIHOC Workshop on Challenged Networks (CHANTS 2007). New York: ACM, 2007: 19-26
- [17] Lindgren A, Doria A, Schelén O. Probabilistic routing in intermittently connected networks [G] //LNCS3126. Berlin: Springer, 2004: 239-254
- [18] Burns B, Brock O, Levine B N. MV routing and capacity building in disruption-tolerant networks [C] //Proc of the IEEE INFOCOM 2005. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 398-408
- [19] Burgess J, Gallagher B, Jensen D, et al. MaxProp: routing for vehicle-based disruption-tolerant networks [C] //Proc of the IEEE INFOCOM 2006. Piscataway, NJ: IEEE, 2006 [2008-07-28]. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4146881&isnumber=4146653>
- [20] Balasubramanian A, Levine B N, Venkataramani A. DTN routing as a resource allocation problem [C] //Proc of the ACM SIGCOMM 2007. New York: ACM, 2007: 373-384
- [21] Jain S, Demmer M, Patra R, et al. Using redundancy to cope with failures in a delay-tolerant network [C] //Proc of the ACM SIGCOMM 2005. New York: ACM, 2005: 109-120
- [22] Wang Y, Jain S, Martonosi M, et al. Erasure-coding based routing for opportunistic networks [C] //Proc of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking (WDTN 2005). New York: ACM, 2005: 229-236

- [23] Widmer J, Boudec J L. Network coding for efficient communication in extreme networks [C] // Proc of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking (WDTN 2005). New York: ACM, 2005: 284-291
- [24] Jain S, Fall K, Patra R. Routing in a delay tolerant network [C] // Proc of the ACM SIGCOMM 2004. New York: ACM, 2004: 145-157
- [25] Jones E P C, Li L, Ward P A S. Practical routing in delay-tolerant networks [C] // Proc of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking (WDTN 2005). New York: ACM, 2005: 237-243
- [26] Sprouopoulos T, Psounis K, Raghavendra C S. Single-copy routing in intermittently connected mobile networks [C] // Proc of the IEEE SECON 2004. Piscataway, NJ: IEEE, 2004: 235-244
- [27] Garetto M, Giaccone P, Leonardi E. Capacity scaling in delay tolerant networks with heterogeneous mobile nodes [C] // Proc of the ACM MOBIHOC. New York: ACM, 2007: 41-50
- [28] Zhao W, Ammar M, Zegura E. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks [C] // Proc of the ACM MOBIHOC. New York: ACM, 2004: 187-198
- [29] Zhao W, Ammar M, Zegura E. Controlling the mobility of multiple data transport ferries in a delay-tolerant network [C] // Proc of the IEEE INFOCOM. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 1407-1418
- [30] Tariq M M B, Ammar M, Zegura E. Message ferry route design for sparse ad hoc networks with mobile nodes [C] // Proc of the ACM MOBIHOC 2006. New York: ACM, 2006: 37-48
- [31] Shah R C, Ro S, Jain S, et al. Data MULEs: modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks [J]. Ad Hoc Networks, 2003, 1(2/3): 215-233
- [32] Dale E, Haahr M. Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant MANETs [C] // Proc of the ACM MOBIHOC. New York: ACM, 2007: 32-40
- [33] Pan Hui, Jon Crowcroft, Eiko Yoneki. BUBBLE rap: Social-based forwarding in delay tolerant networks [C] // Proc of the ACM MOBIHOC. New York: ACM, 2008: 241-250
- [34] Legua J, Friedman T, Conan V. DTN routing in a mobility pattern space [C] // Proc of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking (WDTN 2005). New York: ACM, 2005: 276-283
- [35] Jeremie L, Timur F, Vania C. Evaluating mobility pattern space routing for DTNs [C/OL] // Proc of the IEEE INFOCOM 2006. Piscataway, NJ: IEEE, 2006 [2008-07-28]. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4146952&isnumber=4146653>
- [36] Liu Cong, Wu Jie. Routing in a mobile MobiSpace [C] // Proc of the ACM MOBIHOC. New York: ACM, 2008: 351-360
- [37] Sprouopoulos T, Psounis K, Raghavendra C S. Performance analysis of mobility-assisted routing [C] // Proc of the ACM MOBIHOC. New York: ACM, 2006: 49-60
- [38] Cai H, Eun D Y. Crossing over the bounded domain: From exponential to power-law inter-meeting time in manet [C] // Proc of the ACM MOBIHOC 2007. New York: ACM, 2007: 159-170
- [39] Chaintreau A, Hui P, Crowcroft J, et al. Impact of human mobility on the design of opportunistic forwarding algorithms [C/OL] // Proc of the IEEE INFOCOM 2006. Piscataway, NJ: IEEE, 2006 [2008-07-28]. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4146825&isnumber=4146653>
- [40] Hui P, Chaintreau A, Scott J, et al. Pocket switched networks and human mobility in conference environments [C] // Proc of the ACM SIGCOMM Workshop on Delay-Tolerant Networking (WDTN 2005). New York: ACM, 2005: 244-251
- [41] Lindgren A, Diot C, Scott J. Impact of communication infrastructure on forwarding in pocket switched networks [C] // Proc of the ACM SIGCOMM Workshop on Challenged Networks (CHANTS 2006). New York: ACM, 2006: 261-268
- [42] Zhang X, Kurose J, Levine B N, et al. Study of a bus-based disruption-tolerant network: Mobility modeling and impact on routing [C] // Proc of the ACM MOBIHOC 2007. New York: ACM, 2007: 195-206



**Xiao Mingjun**, born in 1976. Received his PhD degree from the Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China in 2004. Lecturer, member of China Computer Federation. His major research interests include wireless sensor network and information security.

肖明军, 1976年生, 博士, 讲师, 中国计算机学会会员, 主要研究方向为无线传感网络、信息安全。



**Huang Liusheng**, born in 1957. Received his MS degree in computer science from the University of Science and Technology of China in 1988. He is currently a professor and PhD supervisor of the Department of Computer Science and Technology at the University of Science and Technology of China. Senior member of China Computer Federation. His research interests include wireless sensor network, distributed computing, and information security.

黄刘生, 1957年生, 教授, 博士生导师, 中国计算机学会高级会员, 主要研究方向为无线传感网络、分布式计算、信息安全 (lshuang@ustc.edu.cn).



## Research Background

Delay-tolerant networks (DTNs) are a class of networks that experience intermittent connectivity and often long lasting disconnection. Many networks can be considered DTNs, including mobile sensor networks, satellite networks with intermittent connectivity, wildlife tracking networks, pocket switched networks, etc. Since there are no stable end-to-end delivery paths, traditional proactive and reactive routing schemes cannot work well in DTNs. Many DTN routing algorithms are thus proposed. This paper just summarizes these algorithms. At first, the evaluation criterion of performance and the taxonomy for delay-tolerant network routing algorithms are introduced. Secondly, we present the representative routing algorithms including routing strategy and mobility model. Furthermore, we also summarize the advantages and disadvantages of these algorithms. Finally, we discuss the future research directions in this area. This work is supported by the National 973 Basic Research Program of China (No. 2006CB303006), the National Natural Science Foundation of China (No. 60803009), and the Doctoral Programs Foundation of Ministry of Education of China (No. 20070358075).

## 研发动态

### 以研发嵌入式手机安全技术

据报道,以色列迪斯克雷泰克斯公司开发的嵌入式手机安全技术,为确保手机安全、防止黑客和恶意软件的攻击开辟了一条新途径。嵌入式安全技术是从手机生产开始,将手机安全功能与硬件相结合,通过在手机芯片中加入安全模块,将身份识别、认证过程“固化”到手机硬件中,以硬件来生成、存储和管理密钥,并把加密算法、密钥及其他敏感数据,存放于模块的安全存储器中。由于手机关键代码和数据已“固化”在硬件中,手机中没有其他副本,因此,即使手机落入非法者之手,要突破硬件上的安全防护也很困难,从而大大提高了手机的整体安全性能。目前,他们开发的技术除可用于手机芯片外,还可用于存储卡 and 多媒体电子内容的保护等方面,已被一些著名的手机生产商所采用(摘自: <http://www.stdail.com/>, 2009-05-25, 科技日报)。

### 意法半导体与 Soitec 开发影像传感器技术

意法半导体与 Soitec 公司近日宣布,双方将签订一项排他性合作协议。根据此协议,两家公司将合作开发 300mm 晶圆级背光(BSI)技术,制造用于消费电子产品中的下一代影像传感器。当今的前沿影像传感器技术的分辨率正在持续提高,同时也不断要求缩减相机模块的整体尺寸,特别是消费电子市场的要求更为迫切。这意味着影像产业需要开发像素粒子更小、同时还能保持像素灵敏度和高画质的影像技术。在下一代影像传感器开发过程中,背光(BSI)技术是应对这一挑战的关键技术。据悉,两家公司的合作协议包括 Soitec 授权意法半导体在 300mm 晶圆上使用 smart stacking 键合技术制造背光传感器。意法半导体将利用先进的 65nm 及 65nm 以下的衍生 CMOS 制程工艺技术,开发新一代影像传感器(摘自: <http://www.sciencenet.cn>, 2009-05-27, 科学网)。

### 全球数字内容总量逼近 5000 亿 GB

日前,美国国际数据公司(IDC)与 EMC 公司联合发布了题为《经济紧缩,“数字宇宙”膨胀》的最新研究报告。文章指出,尽管去年下半年经济开始恶化,全球数字化信息总量依然呈现出快速增长势头。随着社交网站不断涌现、上网手机层出不穷、政府监视手段日益普遍,目前,全世界的数字内容约为 4870 亿 GB,其运营成本约为 12 万亿美元。IDC 估计,如果将这些数据内容印刷出来,并装订成册,其高度足比冥王星与地球之间的距离多 9 倍。若将数字内容的生成速度折算成书册的加厚速度比美国宇航局速度最快的太空火箭还要快。在“数字宇宙”中,约 70% 的信息由私人产生,包括电话网络、电子邮件、数码照片、网上银行交易以及在 Twitter 等社交网站上粘贴的内容等。企业和组织承担了绝大部分数字内容的保护和托管工作。目前,“数字宇宙”中 30% 多的信息,从病人护理记录到个人财务信息,都需要采取高标准保护措施,IDC 认为,在 2012 年,这一比例将达到 45% (摘自: <http://tech.sina.com.cn>, 2009-05-22, 新浪科技)。

### 新一代超大容量五维光盘存储技术问世

传统的 DVD 和 CD 以二维方式将数据存储在其表面,而全息光盘则是以三维方式存储数据。现在,研究人员首次宣称研制出一种五维光学材料,能在多个维度存储数据,并对激光的不同波长和偏振作出响应。该种新型光学响应材料可使现今 DVD 大小的光盘的存储容量提高 4 个数量级,超过 2000 倍,一张光盘上将能存储两三百部高清电影。新增加的两维指利用光的波长的“色维”和利用光的偏振的“偏振维”。增加的这两维是导致光盘存储容量大幅增加的关键。利用光的偏振特点可使光盘录制多层不同角度的信息,而且各层信息之间不会产生干扰(摘自: <http://www.stdail.com/>, 2009-05-22, 科技日报)。