

# 容迟网络体系结构及其关键技术研究

樊秀梅<sup>1</sup>, 单志广<sup>2</sup>, 张宝贤<sup>3</sup>, 陈 辉<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学计算机科学技术学院智能信息技术北京市重点实验室, 北京 100081;

2. 国家信息中心信息化研究部, 北京 100045; 3. 中国科学院研究生院计算与通信工程学院, 北京 100049)

**摘 要:** 当前的 Internet 体系结构和其中许多协议无法很好的适用存在高延迟和频繁割裂的网络. 当端节点具有严格的能量和存储限制时, 这一问题将更加恶化. 由于移动性和特殊应用需求, 使得像陆地移动网络、军事无线自组织网络、星际网络及无线传感器网络等这样的受限网络缺乏“保持连接”的基础结构. 这些受限网络有它们自己的专有协议而不采用 TCP/IP 协议. 为了实现这些网络之间的互联, 国际上提出了在端到端连接和节点资源都受限时的一种新型网络体系结构和应用接口, 称为延迟容忍网络(简称容迟网络, DTN, Delay-Tolerant Networks). DTN 作为网络互联时传输层上的覆盖网可用来满足随意的异步消息可靠转发. 本文研究分析了容迟网络的应用背景、体系结构、关键技术和一些开放问题, 并给出了未来的发展方向和应用前景.

**关键词:** 容迟网络; 高延迟路径; 频繁网络割裂; 覆盖网络

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 01-0161-10

## State-of-the-Art of the Architecture and Techniques for Delay-Tolerant Networks

FAN Xiu-mei<sup>1</sup>, SHAN Zhi-guang<sup>2</sup>, ZHANG Bao-xian<sup>3</sup>, CHEN Hui<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Lab of Intelligent Information, School of Computer Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Department of Informatization Research, State Information Center, Beijing 100045, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The successful architecture and supporting protocols of today's Internet operate poorly when faced with operating environments characterized by very long delay paths and frequent network partitions. These problems are exacerbated by end-nodes that have severe power or memory constraints. Because of lacking "always-on" infrastructure in mobile and extreme environments, many such networks have their own specialized protocols, and do not utilize TCP/IP. To achieve interoperability between them, researchers had proposed a network architecture and application interface structured around optionally and reliable asynchronous message forwarding, with limited expectations of end-to-end connectivity and node resources. This architecture is called delay-tolerant networks (DTN). It operates as an overlay network above the transport layer. In this paper, we study the state-of-the-art architecture and key techniques for DTN, discuss their merits and deficiencies, and point out potential issues. It is our purpose to stimulate more research in this new promising network.

**Key words:** delay-tolerant networks; high delay path; frequently network disconnection; overlay networks

### 1 引言

多年的实践证明, 使用 TCP/IP 协议簇的 Internet 是相当成功的, 但 TCP/IP 协议簇的平稳运行是依赖如下物理链路特性假定的: ①在数据源和目的地之间存在端到端的路径; ②在网络中任何节点对之间的最大往返时间(RTT)不能太长; ③端到端的分组丢失率较小. 不幸的是, 现在有一类越来越重要的所谓“受限网络(Challenged network)<sup>[1]</sup>”, 它可能违反了上述假定中的一个或

多个, 这使得当前的 TCP/IP 模型不能很好地为其提供服务.

“受限网络”最初是由于主机和路由器的移动而出现的, 也可能是由于能量管理或冲突导致的网络分割/断开(network partition/disconnection)而形成的. 下面是这类网络的几个典型例子<sup>[2]</sup>.

● 陆地移动网络(Terrestrial Mobile Networks): 在许多情况下, 由于节点的移动性或射频(RF)冲突, 这些网络可能变得不可想象的割裂开. 在一些情况下, 网络可

收稿日期: 2006-10-17; 修回日期: 2007-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(No. 90604012, 60673054); 国家 863 高技术研究发展计划(No. 2007AA01Z220); 北京理工大学基础研究基金(No. BIT-UBF-200501F4209)

能难以形成一条端到端(E2E)的路径,并且网络的割裂方式可以预测,例如,一辆经常往返的公共汽车可以被用作消息存储和转发的工具,因为它只有有限的 RF 通信能力,也就是有限的通信范围.当这类公共汽车从一个地方行进到另一个地方时,它可以在附近的客户机(clients)和它将要往地点的远程机(remote clients)之间提供消息交换服务.

- 外来媒体网络(Exotic Media Networks):外来通信媒体包括近地卫星通信、长距离无线链路(例如秒级或分钟级传播延迟的太空通信)、在空气或水中采用声波调制的通信等.这些系统可能有可预言的高延迟(例如由于行星的动态性)、也可能因环境因素引起的损耗、或者提供一种可预期的偶尔可用的存储转发网络服务(例如每天一次或多次通过的低地轨道通信卫星).

- 军事无线自组织网络(Military Ad-Hoc Networks):这类网络可能部署在敌对环境.节点的移动性、不可预测的环境因素或者故意的人为干扰都可能引起网络割裂.除此之外,当有高优先级的业务时,低优先级业务需要和高优先级业务去竞争带宽,这将使得消息转发经历更大的排队延迟.同时,出于可靠与安全考虑,这类系统需要有严格保护措施的下层基础结构.

- 传感器和传感器/执行器网络(Sensor and Sensor/Actuator Networks):这类网络中的节点存在着严重的能量、存储空间和计算能力的不足.此外,这类网络可能规模很大,包含数千乃至数百万量级的节点.为了保存能量,这类网络中的通信常常是预订的,可能在一段时间内不存在及时的通信路径.传感器和传感器/执行器网络通常通过具有协议转换能力的代理节点与其他网络互联.

在以上这些网络中使用成功的 Internet 体系结构和协议是可以想到的最显然的解决方式.但由于这些网络应用可能有非常大的链路延迟、不存在端到端路由、缺乏连续的能量供给、缺乏大存储能力等,这些特性对现有 Internet 体系结构和协议的应用都提出了严峻的挑战.为使现有 Internet 体系结构和协议适应这些特殊环境,目前已有学者提出的一种方法是“链路修正法(link-repair approaches)”<sup>[3]</sup>,它试图将问题链路转化为适应 TCP/IP 的类似链路,努力保持 Internet 的端到端可靠性和共享模式,要求所有的路由器和端节点执行 IP 协议.另一种方法是“网络特殊代理法(network-specific proxies approaches)”<sup>[4]</sup>,它是将受限网络作为 Internet 的边缘(edge),通过特殊代理连接 Internet 和受限网络,但它没有提供一种通用的方法进行数据传输.研究和分析表明这两种方法都不能很好地解决容迟网络(DTN, Delay-Tolerant Networks)中存在的问题.

容迟网络体系结构研究是因特网研究任务组

(IRTF)的容迟网络研究组(DTNRG\*)在星际网络研究组(IPNRG\*\*)基础上发展而来的,最初是为行星际 Internet 通信而提出的,它主要聚集在高延迟的太空通信和缺乏连续联接的不同网络协同工作环境<sup>[2,35]</sup>,是一种面向消息(message)的可靠的覆盖层体系结构,是形成受限网络互联的适当方法.容迟网络的设计受到了传统 Internet 互联协同设计思想、电子邮件健壮的非交互传递思想和美国邮政系统业务分类思想的影响,它提供了异步消息传递的业务,可以和 TCP/IP 联合使用.

## 2 受限网络的基本特性

受限网络不同于现有通信网络,它主要具有如下几个特性<sup>[2]</sup>:

### (1)路径和链路特性

- 高延迟、低数据率(High latency, low data rate):端到端延迟表示端到端传输路途上每一跳的延迟总和.每一跳上经历的延迟是由通过相关链路时的传输时间、处理时间和传播时间组成的,可能还要加上排队时间.如果忽略处理时间和排队时间,传输时间和传播时间是直接受下层传输媒体影响的.对受限网络来说,传输率可能较小(例如大约 10kbps),延迟可能较大(大约 1 秒或以上),而数据率在很大程度上可能是不对称的(例如一个高速率的下行数据信道和低速率的上行控制信道).

- 网络断开(Network disconnection):在许多受限网络中,端到端断开可能比端到端连接更普遍.一般说来,断开可能是由于错误或其他原因造成的.由于错误而断开在传统网络中已有很多研究,这里不再考虑.由于移动和低占空比(low-duty-cycle)影响,非错误(Non-faulty)断开频繁地出现在无线环境中.由于移动引起的断开是可预测的(例如通过卫星系统、扮演数据载体的公共汽车等)或随机的(由于漫游而到达通信范围的节点);由于低占空比系统操作引起的断开在低能力设备(如无线传感器)中是普遍存在的,也是可以预知的.

- 长排队延迟(Long queuing delay):在统计复用分组网络的多跳路径中,与传输和传播延迟相比,排队延迟通常起主导作用.这样的网络中,排队时间很少超过 1 秒(通常会更小),并且如果下一跳不是即时可达的就会丢弃分组.相反,在断开很普遍的受限网络中,排队时间可能是相当大的(几小时,甚至可能几天).这就表明,消息可能必须在中间路由节点存储相当长的时间,并且已经做出的下一跳选择可能作废(revoked).也就是说,如果发现消息转发更好的路由器,消息就应当被传

\* <http://www.dtnrg.org/>

\*\* <http://www.ipnsig.org/>

递到新的下一跳。

## (2)网络体系结构

● 互操作性:在大多数受限网络中,网络体系结构主要是由链路和媒体接入控制协议组成的,基本没有考虑互操作性问题.其原因是大多数情况下,链路上几乎很少有受限网络中的通信,且在互联中使用这样的链路还没有成为一个主要需求——这还只是一个研究领域.因此,这些网络相对简单、应用范围较小、且不能像 Internet 那样提供基本的分层和抽象功能.不考虑互操作性,受限网络的设计可能采用特殊的应用格式、受限的节点地址和命名能力、数据分组大小限制等等.他们在可靠执行、拥塞控制和安全等方面也可能没有进行考虑.网络设计必须能够在最小程度上保证下层协议能力和可扩展性.

● 安全性:在受限网络中,通信媒体是外来的(ex-otic)并且可能是被过量预订的.通信链路能力是一个宝贵资源,数据转发应当被认证、并采用接入控制等机制保护.如果采用综合业务的话,也应当实现接入控制乃至服务分类(CoS, Class of Service).对链路资源十分宝贵的容迟网络来说,端到端的安全策略通常并不吸引人,主要原因是:第一,端到端方式一般要求某种形式的端到端密钥交换,而在许多容迟网络中这是不可能的;第二,在认证和接入控制执行前传输一些业务流到它的目的地是不合要求的.

## (3)端系统特性

● 寿命有限(Limited longevity):在一些受限网络(如无线传感器网络、军事无线移动网络和紧急反应网络等)中,端节点可能被放置在敌对环境或恶劣环境中.在这种情况下,由于环境恶劣或能量消耗,设计者可能并不期望网络节点有较长寿命.如果这样的网络长期断开,那么一个特殊消息传输的往返时间或单向时间都可能超过发送节点的寿命.显然,在这种情况下是不能使用通常的反馈确认机制去检验消息传输.因此,可靠传输的责任应当被委派给一些其他设施,并且任何成功或不成功传输的通知都需要被传输到一个具有反馈功能的代理上.

● 低占空比操作(Low Duty Cycle Operation):当节点被放置在没有供电系统的区域时,它们通常使用电池(也可能使用太阳能充电),并且即使可以充电,这些系统通常也通过限制他们的占空比去努力节约能量.在一些情况下(例如电池供电的传感器),为了实现整个网络的长寿,占空比维持在 1%.这样的设备定期收集数据,并以一定的速率(通常很小)进行数据汇报.对这样的系统,通常需要预先规划正常的运行时间,隔离影响路由协议的操作.当然,在不能正常工作期间发现一个新节点加入网络也是一个急需解决的问题,已有几

种方法来解决这个问题,例如“wake-up radios”<sup>[5]</sup>,在数据到来时它能够监控通信并唤醒主要的无线设备.

● 资源有限(Limited resources):上面提到的几个受限网络的例子中使用了有限存储和处理能力的节点.例如,对于一个存储能力有限的传感器来说,如果它的存储被正在传输中的数据全部使用,那么它可能被禁止收集更多的数据.除此之外,端节点还需要至少保持 RTT 时间的重传缓存空间.在这期间,节点执行能量降级模式操作,这使得系统设计非常复杂,特别是在收到其他异步消息或监测到一些突发事件发生时尤其严重.

## 3 容忍延迟面向消息的覆盖层体系结构

受限网络在性能特性和网络体系结构等方面都和 Internet 相背离.研究表明<sup>[6]</sup>,试图在这种网络上通过修补、加强已有协议来进行应用是十分困难和难以适应的;通过构造一个覆盖层代理使得它可以在适当的时候使用 Internet 协议,但在其他时候支持受限环境下的其它协议族的方法也是不太理想的.因此,研究者们提出了一种新的面向受限网络的“容忍延迟的面向消息的覆盖层体系结构”,简称容迟网络(DTN).

DTN 是基于消息(Message)交换的,其数据单元可能是消息、分组或“捆绑(bundles)”.一些消息聚合在一起传递被称为“捆绑”<sup>[7]</sup>,处理它们的路由器被称为“捆绑转发器(bundle forwarders)”或 DTN 网关. Burleigh 等人提出了一个新的端到端覆盖层网络协议<sup>[36]</sup>,称为“绑定(bundling)”,它的功能类似于 Internet 中 DNS 的域名到地址的映射.

DTN 的体系结构不同于 Internet 的体系结构,它被设计来解决受限网络存在的问题. DTN 引进了一个所谓的“捆绑层(bundle layer)”<sup>[4~9]</sup>,是面向异步消息传输的覆盖网,操作在不同网络的传输层上.“捆绑层”提供和 Internet 网关相似的功能,但有很大区别,因为它聚集在虚消息转发而不是分组交换. DTN 体系结构的具体分层形式见图 1 所示.

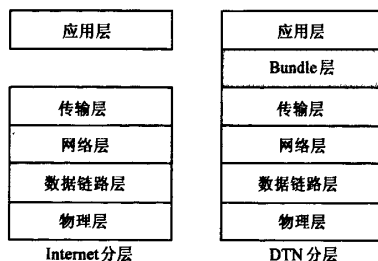


图 1 Internet 与 DTN 的分层体系结构对比

与现有通信网相比较,DTN 网络引入了一些新术语,并且重新定义了一些已有术语,主要有:

### (1) DTN 网关和区域(DTN Gateways and Regions)

DTN 作为一个“覆盖层”体系结构可运行在不同网络协议栈之上,当一个 DTN 节点和两个或更多不同网络有物理连接时提供网关功能.DTN 网关综合了 Metanet 的“waypoint”概念<sup>[4]</sup>和初始 ARPANET 中的网关定义<sup>[9]</sup>。“waypoint”概念描述了为进入一个区域数据必须通过的一个点.DTN 网关采用可靠的消息路由代替了“尽力而为”的 IP 分组交换.当要求可靠传输和将全球命名转换为本地名称时,DTN 网关将消息可靠地存储在非易失性存储器中.DTN 网关也进行安全检查,以确保转发是容许的.

如果两个节点可以不通过 DTN 网关进行通信,那么称这两个节点处在同一区域中,区域边界用来表示不同网络协议和地址族之间的互联点.图 2<sup>[2]</sup>是 DTN 体系结构的一个简单例子,图中有四个区域,分别为 A、B、C、D.区域 B 包括一个携带 DTN 网关的经常运营的公共汽车,该公共汽车往返于 DTN 网关 3 和 DTN 网关 5 之间.区域 D 包括一个定期连接的近地卫星链路.

### (2) 接触(contact)

“接触(contact)”指的是一个通信的机会.在一个间歇连接网络(intermittently connected network)中,链路能力在 0 和一个正数之间波动变化.链路能力是正数的链路称为“接触”.接触量被定义为接触时间与接触链路能力的乘积.接触分为五类<sup>[2]</sup>:

- 持续接触(Persistent):一直处于连接状态.例如,像 DSL 或 Cable Modem 等“一直在线”的 Internet 连接.

- 点播接触(On-demand):一旦有需求,就可以启动并保持所需要的连接时间.例如,拨号连接.

- 间歇的、可预定的(Intermittent, scheduled)接触:建立连接合同,可以保持在特定时间和特定区间的连接.例如,近地轨道卫星.

- 间歇的、偶然的(Intermittent, opportunistic)接触:这类接触是不可预定的,只有在链路偶然可用时才可以使用.例如,移动的红外设备或蓝牙设备.

- 间歇的、可预测的(Intermittent, predicted)接触:不能预定,但可以基于早期的连接模式、观察到的消息等使用概率来预测连接.这是一个正在研究的开放领域,几乎没

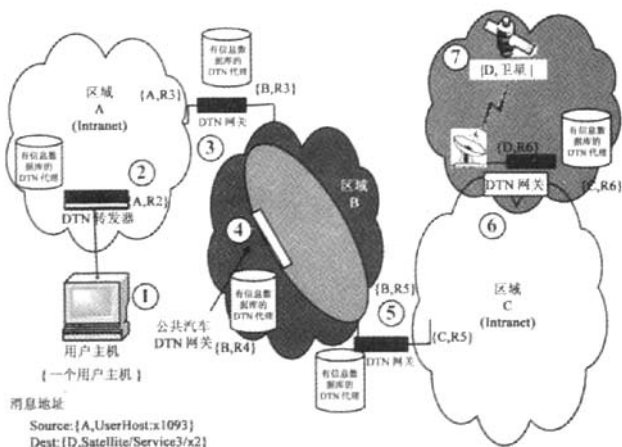


图 2 DTN 体系结构的示例

有提出的方案。

### (3) 名称二元组(Name Tuples)

为了支持 DTN 消息的路由,采用名称数组来标识目标或目标组.名称数组由两个可变长度部分组成,其形式为{区域名,实体名}.区域名全球唯一,可以通过分级构建,具有拓扑意义.实体名表示在某一特定区域中的名称,它可以在区域外不唯一.实体名可以是任意结构.DTN 消息长度是没有限制的,并且不保证按序传输.当一个消息传输经过一个长的、异构区域集合时,可以仅仅用区域名来路由.在到达目的区域边界时,如果必要,实体名消息被翻译成本地适用的协议标准名称(或地址).

### (4) 邮政类型服务(A Postal Class of Service)

受限网络意味着各种资源受限.因而采用基于优

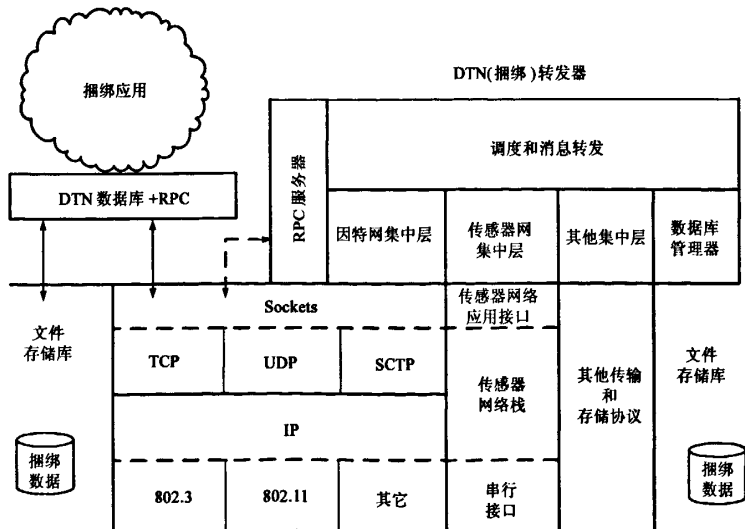


图 3 DTN 转发器的结构

先权的资源分配是很必要的.但是在许多情况下为了可实现或使用户不被搞糊涂,应避免使用复杂的服务类型(CoS, class of service)结构.在 DTN 中采用美国邮政服务中的服务类型子系统作为 DTN 中的“束服务类型”,主要提供保管转发、收到回复、保管转发通告、转发消息通告、递送优先级和认证六类 CoS 服务<sup>[30]</sup>.

#### (5) 保管传递(Custody Transfer)

DTN 体系结构包括稳定点(P)和非稳定点(NP)两类消息路由点.假定稳定点可以容纳一些稳定消息存储,而非稳定点不行.除非不能或不想去存储一些特殊消息,稳定点使用适合一定区域的传输协议来参与保管传递.保管传递指的是消息从一个 DTN 跳到下一 DTN 跳,并且能可靠地传递.保管传递是为了加强端到端连接的可靠性并抵抗高丢失率和资源缺乏而提出的概念.事实上,保管传递可看作是端到端可靠性的优化,和端到端原理是相一致的.

因为捆绑转发功能假定下层具有可靠的传递容量,且在形成保管传递时传递容量具有消息边界,所以缺乏这些特性的传输协议应当得到扩展.图 3<sup>[2]</sup>表示了捆绑转发器的执行结构\*.如图 3 所示,可靠传递由下层传输来提供,捆绑转发器仅仅管理连接状态和连接失去后的初始重启工作.在面向连接协议情况下,通常通过应用接口来监测连接的丢失.例如,在太空通信中,恰当的通信时机和路径延迟可能由于行星的动态性而难以确定.

#### (6) 拥塞控制和流量控制

作为一个逐跳通信体系结构,DTN 的流量控制和拥塞控制是紧密相联的.DTN 中的流量控制指的是限制 DTN 转发器向它的下一跳的发送速率.拥塞控制指的是如何处理长期存储在 DTN 转发器中的内容.

对于流量控制机制的执行,DTN 转发器试图利用本区域中下层传输协议使用的流量控制机制.对大多数成熟网络来说,这样的一些机制已经存在,例如 TCP, X.25, RTS/CTS, XON/XOFF, 直接接入/速率控制等.通常情况下,在 DTN 中是假定流量控制机制是存在的,并可以确保消息的可靠传递.

和其他网络相比,DTN 的拥塞控制是相对困难实现的,主要因为如下两个特性:第一,在将来的一段时间可能无法建立连接(如此累积的数据可能在不久的将来没有机会传出去);第二,除非在极端情况或过期后,否则已经收到的保管消息不能被丢弃.目前主要使用基于优先级的 FCFS 来分配保管存储.如果 DTN 转发器接受合同外的保管消息,那么将出现阻塞.这样,节点的长期存储可能被完全消耗掉,因此,要避免非保管消息传输.

拥塞控制机制可以分为主动和被动两类.主动

(Proactive)方法通常包括一些接入控制形式去避免在开始处的拥塞攻击.许多情况下,一个单区域可能是在一个单实体的管理控制之下,这种方法是实用的.除此之外,任何过期的消息都将被安全丢弃.如果主动方式是不够的或不可用时,则需要使用被动(Reactive)方法,这将使得性能下降.

## 4 DTN 网络关键技术与相关研究成果

DTN 体系结构主要是针对星际 Internet<sup>[7]</sup>而设计的.它描述了一个有意义的进化发展.影响 DTN 网络正常运行的关键技术有很多,目前学术界主要关注的包括路由、传输协议、安全和组播等技术.在这些方面的研究尽管时间较短,但发展很快,并已经形成了一些研究成果可供进一步深入研究借鉴和参考.

### (1) 路由技术

在 ACM SIGCOMM2004 年会中,Jain 等人提出了 DTN 网络中的路由问题<sup>[16]</sup>,明确提出了 DTN 路由的主要问题就是确定消息如何端到端地穿越一个随时间变化而连续变化的网络,且这种动态性是可能预知的.文献[12,17,18]研究了网络拓扑不可预知时,如何在无线传感器网络/移动 Ad-Hoc 网络中提供连接.Zhang<sup>[40]</sup>在已有研究成果基础上,将 DTN 路由策略分为两大类:一类为确定性路由方案,它假定将来的移动和连接是可以知道的、是可预测的;另一类为随机性路由方案,它假定网络是动态的、不确定的.主要的确定性路由方法有:①基于树的方法(Tree approach)<sup>[41]</sup>,②时空路由(Space time routing)<sup>[42]</sup>,③修正的最短路径方法(Modified shortest path approaches)<sup>[16]</sup>;主要的随机性路由方案有:①传染性/随意散发方式(Epidemic/random spray)<sup>[43]</sup>——一种在不知道任何消息时将分组转发给所有邻节点的方法.②基于历史消息的方法(History or predication-based approach),它主要是根据一些历史消息来决定是否存储分组并等待好的机会,或者决定哪一个节点和什么时间去转发.一些协议提出了基于下一跳消息的每联系路由(Per Contact Routing)<sup>[44]</sup>和基于平均端到端性能参数的每联系路由<sup>[40]</sup>.③基于模型的方法(Model-based)<sup>[45]</sup>,④可控移动方法(Control movement)<sup>[46]</sup>,⑤基于编码的方法(Coding-based approaches)<sup>[47]</sup>.

在频繁不连通网络中的路由技术方面已经有了一些研究成果.在研究动物行为的斑马网实验(Zebranet)<sup>[11]</sup>中,当斑马走进基站覆盖区域时,放置在斑马脖颈上的无线传感器节点可以上行汇报其位置等消息\*\*.在数据骡实验(DataMules)<sup>[12]</sup>中,如果在传感器部

\* RPC(Remote Procedure Call)

\*\* <http://www.princeton.edu/mmm/zebranet.html>

署区域行走的“mule”能够定期访问传感器节点,并且提供非交互式的消息存储转发服务,那么低能量的传感器节点就可以节约能量。大量的早期工作<sup>[13]</sup>主要是针对在移动 Ad-hoc 网络上运行 IP 机制,依赖于反应式协议,仅在消息需发送时才启动路由进程。DTN 在网络断开期间可以采用这种模式。Internet 内容路由<sup>[14]</sup>主要使用名字路由来提供 Internet 上的内容分发,提高其可扩展性和性能。

DTN 利用临时连接代替端到端网络连接去中继数据,这与邮政网络<sup>[21]</sup>相似。在 DTN 环境中,节点通常缓存有限,甚至不存在持续可用的端到端路径,这就限制了传统路由方式的使用。针对不连接网络中最早提出的一种路由方式是传染性路由(Epidemic routing)<sup>[18]</sup>,它通过节点间以随机交换的方式复制消息,直到邻节点存有每一个消息的拷贝。文献[16]首次提出了一个如何在 DTN 网络中评估路由算法性能的框架,并提出了几个具体的路由算法。DTN 路由的一个主要目标是最大可能地传递消息,因为消息可能由于路由环或缓存耗尽时被丢弃。在文献[19]中,Liu 等人提出了几种算法来研究不确定随机 DTN 网络中通信概率低、可供选择路径少等导致的路由性能差这一难题,并首次讨论了随机 DTN 的网络模型。随机 DTN 网络中的延迟、可用资源、开始时间和连接间隔时间等参数都是不确定的、随机的。Jones 等人也提出了一种实用的仅使用网络观测消息的 DTN 路由协议<sup>[20]</sup>。该论文设计了一个参数矢量去评估一个消息被传递到下一跳之前必须等待多长时间。文献[23]提出了一个适合间歇网络的概率路由协议 PROPHET,它在路由过程中使用了曾经遭遇和转移的历史消息。PROPHET 设立了一个在节点  $a$  和每一个已知目的节点  $b$  之间的可预测递送概率参数  $P_{(a,b)}$ 。当两个节点相遇时,他们交换自身的总消息矢量和可预测递送概率参数。

DTN 路由是一个富有挑战性的问题,它要求选择路径、调度传输、评估传递性能和缓存管理等技术。

### (2) 组播技术

组播技术在因特网和移动自组网中已有深入广泛的研究<sup>[25-27]</sup>,组播服务支持一组用户的数据分发。许多潜在的 DTN 应用是基于组播方式的,并且需要高效的组通信网络技术支持。但是由于 DTN 网络的频繁网络断开特性使得 DTN 中的组播成为一个难题。DTN 组播不仅要求新的组播定义,而且带来了路由设计的新问题。Zhao 和 Ammar 等人首次提出了新的 DTN 组播语义模型<sup>[24]</sup>,设计了四类采用不同路由策略的 DTN 组播路由算法,并且提出了在 DTN 中评价这些算法的构架。

组播是 DTN 网络中的重要支撑技术,已有一些研

究者开始了这方面的研究,并已取得了一些研究成果。Symington 等人提出了 DTN 网络中的非保管(Non-Custodial)尽力传送组播方案<sup>[28]</sup>,他们定义了 DTN 网络中为了提供非保管捆绑组播传输的数据格式要求和一些限制。该文描述了如何使一个源节点使用捆绑协议<sup>[29]</sup>以非保管的方式传递一个捆绑包到多个目的节点,而不是为每个目的节点独立单播一个捆绑包。捆绑协议的目的是在这些特殊网络中提供协同性。在捆绑协议基础上,Symington 等人进行了扩展来支持 DTN 网络中保管组播捆绑递送<sup>[30]</sup>。这一扩展被用来支持从单源到多个目的点的保管传递和基于保管的重传。

### (3) 安全技术

与现有通信网络中的安全问题不同,DTN 中的安全问题有其自身的特殊性。DTN 网络基础结构的保护和接入基础结构控制是相当重要的。文献[31]讨论了 DTN 中的一些强制约束,并提出一种可扩展的基础保护方案。该安全系统是基于公共密钥技术的:一个用户想要使用 DTN 服务,就必须用证书注册它的公共密钥,然后它会收到一个被证书认证标记的公共密钥拷贝和一个被证书认证标记的基本信用拷贝。基本信用批准用户可以使用其中的一些 DTN 服务类,基本信用有一个期满时间。

DTN 安全模型主要由四部分组成:用户、DTN 路由器、DTN 区域网关和 DTN 证书认证。当一个 DTN 用户希望通过 DTN 路由器发送数据时,它必须首先向路由器提供它标记过的公共密钥和标记过的信用。路由器核实签名并将公共密钥和信用存储在缓存中。一旦路由器决定转发消息,它就产生一个用它自己私钥的新签名加在消息上进行传递。在 DTN 中,用户和转发节点都有密钥对和证书,用户的认证表明他们的服务类型的权利。发送者能够使用他们的私钥签署绑定,产生一个特殊绑定的数字签名。这个签名允许接收者使用发送者的公钥确认发送者的真实性(例如,他们是否是消息的发送者)、消息的完整性(例如,消息是否没有被篡改)和发送者的服务类型权限。

DTN 体系结构的安全模型与传统的网络安全模型有很大不同。现有的大多数网络安全方法试图去认证用户的身份和消息的完整性,而不认证转发消息的路由器。但在 DTN 中,转发节点(路由器或网关)也需要被认证,且发送者消息被转发节点认证以使得通过防止禁止流而使得网络资源被保存<sup>[34]</sup>。

为了实现安全模型,每个消息通过加一个不变的“邮戳(postage stamp)”来保持发送者标识、一个和消息相关的请求 CoS 的批准、及其他密码方法来校验消息内容的正确度。在 DTN 的每一跳,DTN 路由器检查证书,并尽可能早地丢弃认证失败的业务流。

#### (4) 传输协议

DTN 体系结构提出了面向消息的存储转发覆盖层方法以处理受限网络中频繁网络断开、高延迟和异构性等问题。其中一个重要的建议是采用保管传递来加强端到端的可靠传递。保管传递协议是 Cerf 等人首次提出的<sup>[32]</sup>, Fall 等人在文献<sup>[33]</sup>中做了进一步的工作,描述了保管传递的实施和结构,并指出保管传递和数据库的不同。节点是否接受消息并进行保管取决于该节点的当前资源、路由情况、消息的优先级、消息大小、剩余消息生存时间、安全情况及本地策略限制等因素。在网络中传输的消息也可能被分段和重组。

在消息传输中如果出现 DTN 网络拥塞,其主要解决方式是丢弃超时消息和没有接受保管的消息,对已经接收保管的消息将它们转移到另一个保管代理人(custodian)。实际上,保管传递的目的是将消息可靠传递的责任从一个节点转移到另一个节点,始于发送者,终于目的点。在 DTN 协议头字段中,消息(或消息片段)显示它们目前的保管代理人,而当消息从一个保管代理人转移到另一个保管代理人时,该字段被更新。

#### (5) DTN 实验

DTN 实验是目前开展 DTN 研究的一个重要方面,国际上学者已经进行了一系列研究。图 4<sup>[2]</sup>描述了几个试验中用到的拓扑逻辑。实线链路表明总是连接的,点状线连接指示了间歇的链路。间歇的链路是周期性的,并且在漫游者(Rover)和工作站之间的端到端路径不是总存在的。数据发生在漫游者 1 附近的尘埃(Motes)或者连接漫游者 2 的照相机。尘埃是小的电池动力计算机,该计算机配备有无线电和接口连接器,支持广阔的传感器组。在这种情况下,轻量的阅读被发送给漫游者 1,此处 DTN 代理压缩这些阅读消息到 DTN 消息中(使用一个位于代理汇聚层的尘埃代理),并把它们通过 DTN 网络传输到一个在用户工作站上的尘埃应用程序。这个结构允许从传感器阅读消息中积累,即使在周期性断开时也没有丢失。照相机受一个与 DTN 连接的图像捕获程序的驱动——CFDP\* 文件传输程序的兼容性执行。CFDP 是一个标准化文件传输系统,它用于支持地球和空间站之间的空间通信以传送移动文件。

### 5 DTN 网络设计中存在的主要问题

目前虽然国际上开展 DTN 研究的时间较短,但已取得了一些积极有效的研究成果,同时,也存在着很多

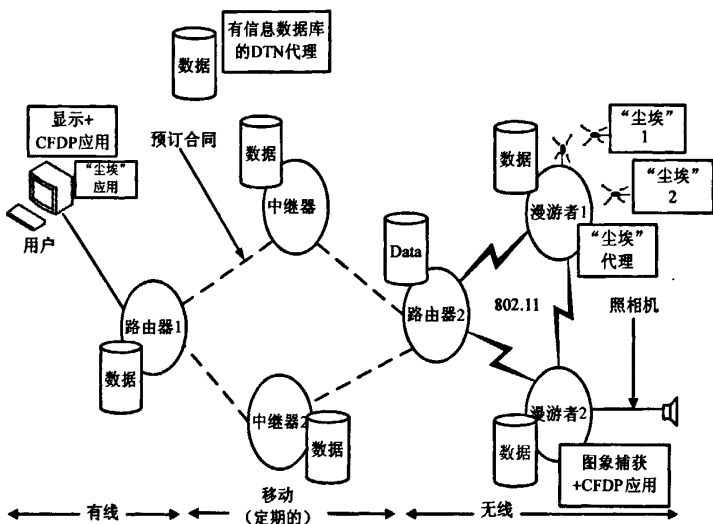


图 4 实验环境中的拓扑原型图

开放性问题值得进一步深入研究,我们认为主要有以下一些方面:

#### (1) 如何设计有效的 DTN 协议

DTN 网络的主要挑战在于非常长的端到端延迟(有时长达几天)、频繁的网络中断、和随机的或可预测的连接。这就导致在设计高效的 DTN 协议时需要考虑这些特殊性,这也是一个难点,有待于针对不同的 DTN 环境设计实用、高效的协议和算法。

#### (2) 如何传递大块数据

DTN 网络中传输的消息是没有大小限制的,如何在传递大数据时提高可靠性和数据保管传输的有效性将是保障 DTN 网络正常运行的关键问题。

#### (3) 如何将具有不同特性、支持不同支持协议的网路互联在一起

受限网络有多种类型,可能它们的特性和支持协议等都是不同的。在不同应用、不同网络有相互交互消息的需求下,如何将这些网路互联起来是亟待解决的一个关键问题。

#### (4) 如何有效地实现 DTN 和 Internet 的互联互通

DTN 网络不采用 TCP/IP 协议,如何设计其协议与算法,使其可以更有效地与 Internet 进行通信。

#### (5) 如何设计实用的组播(Multicast)和泛播(Any-cast)协议

DTN 路由研究中更多地讨论单播(unicast)情形,对组播和泛播的研究较为有限。但在 DTN 的一些应用中,更多地是组成员之间的消息共享,为了更好地节约资

\* CFDP: CCSDS File Delivery Protocol (CFDP), 空间数据传递委员会规定的文件传递协议。

源和提高通信效率,设计实用的组播和泛播协议势在必行。

(6)如何设计适合 DTN 环境的高效调度机制和缓存管理策略

DTN 网络经常处于中断连接状态,现有的 IP 网络的调度机制和缓存管理策略将不再适用,需要设计适合 DTN 环境的更加复杂的调度机制和缓存管理策略以有效地降低丢包率、提高服务质量。

(7)如何在没有任何业务流模式消息的情况下评价 DTN 的各种策略和性能

DTN 网络中关键的性能参数是什么?在没有任何业务流模式消息的情况下如何评价提出的 DTN 策略和其性能优劣.这将关系到设计有效 DTN 解决方案时的目标问题。

(8)如何设计安全机制以保证转发节点的可靠性

DTN 的应用背景决定了它所传输消息的重要性.设计可靠的认证机制、设计保证转发节点可靠性的安全机制将有助于 DTN 网络中消息传输的保密性、高效性.当前 DTN 安全中另一个主要的开放性问题是对密钥的管理缺少容迟的方法。

## 6 DTN 的发展趋势和应用前景

DTN 是对 Internet 体系结构的一个根本改变,而不仅仅是修修补补,它采用了一系列不同于 Internet 的设计理念:消息代替了分组、可靠安全的 hop-by-hop 通信代替了 end-to-end 通信、基于名称的路由代替了基于地址的路由、局部连接网络代替了全连接网络.DTN 可以很容易地覆盖在基于 TCP/IP 的 Internet 之上并保持兼容性。

DTN 有许多潜在的应用,比如星际网络(IPN, Interplanetary network)、移动 Ad-hoc 网络、泛在无线传感器网络、ZebraNet<sup>[11]</sup>、DataMule 和乡村网络(Village networks)<sup>[38,39]</sup>等受限网络环境.DTN 主要针对端到端连接和节点资源都有限时的一种网络解决方案,用以满足随意的异步消息的可靠传递.DTN 的研究和发展将对军事战争、航天通信、灾难恢复、应急抢险等领域的消息交互提供有力的科学理论和技术支持,并极大地推进未来网络通信智能化、泛在化、融合化的发展趋势。

对我国而言,紧密跟踪和分析国际上 DTN 研究的发展趋势,结合我国相关领域的实际应用需求,着力开展 DTN 基础理论研究和应用示范,同样具有非常重要的意义,值得我国学者引起高度重视。

### 参考文献:

[1] E Smith, F W Weingarten. Research Challenges for the Next Generation Internet [OL]. www.cra.org/Policy/NGI/re-

search\_chall.pdf, May 1997.

- [2] K Fall. A delay-tolerant network architecture for challenged internets[A]. in Proceedings of ACM SIGCOMM'03[C]. Aug. 2003. 27 - 34.
- [3] MIT Media Lab, Viral Communications Group, link-repair approaches[OL]. http://viral.media.mit.edu.
- [4] M A Schickler, M S Mazer, C Brooks. Pan-browser support for annotations and other meta-information on the world wide web [A]. Fifth International World Wide Web Conference [C]. Paris, France. 1996. 6 - 10.
- [5] M Chrobak, L Gasieniec, D Kowalski. The wake-up problem in multi-hop radio networks [A]. in Proc., 15th ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA) [C]. 2004. 985 - 993.
- [6] R Durst, G Miller, E Travis. TCP extensions for space communications [A]. In Proc. ACM MOBIKOM'96 [C]. 1996. 15 - 26.
- [7] V Cerf, et al. Interplanetary Internet (IPN): Architectural Definition [OL]. Available from http://www.ipnsig.org/reports/memo-ipnrg-arch-00.pdf.
- [8] J T Wroclawski. The MetaNet: White Paper - Workshop on Research Directions for the Next Generation Internet [OL]. Available from http://www.cra.org/Policy/NGI/grouppapers.html, May 1997.
- [9] V Cerf, R Kahn. A protocol for packet network intercommunication [A]. IEEE Trans on Comm, COM-22(5) [C]. 1974. 637 - 648.
- [10] J Hill, R Szewczyk, A Woo, S Hollar, D Culler, K Pister. System architecture directions for network sensors [A]. In Proc. ASPLOS [C]. 2000. 93 - 104.
- [11] P Juang, H Oki, Y Wang, M Maronosi, L Peh, D Rubenstein. Energy-efficient computing for wildlife tracking: design trade-offs and early experiences with zebraNet [A]. In Proc. ASPLOS 2002 [C]. 2002.
- [12] R Shah, S Roy, S Jain, W Brunette. DataMULEs: Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks [A]. to appear, IEEE SNPA Workshop [C]. 2003. 215 - 233.
- [13] C Perkins, ed. Ad Hoc Networking [M]. Addison Wesley, 2001.
- [14] M Gritter, D Cheriton. An architecture for content routing support in the internet [A]. USENIX Symposium On Internet Technologies and Systems [C]. San Francisco: IEEE & Wiley Press, 2001.
- [15] D Clark. The design philosophy of the DARPA internet protocols [A]. ACM SIGCOMM 1988 [C]. Stanford, CA, Aug. 1988. 106 - 114.
- [16] S Jain, K Fall, R Patra. Routing in a delay tolerant network [A]. SIGCOMM'04, Vol 34 [C]. 2004. 145 - 158.
- [17] X Chen, A L Murphy. Enabling disconnected transitive com-



- munication in mobile adhoc networks[A]. In Proceedings of the Workshop on Principles of Mobile Computing(PODC'01)[C]. 2001. 21 - 23.
- [18] A Vahdat, D Becker. Epidemic Routing for Partially-Connected Ad hoc networks[R]. Technical Report CS-2000-06, Duke University, July 2000.
- [19] T Liu, Sushant Jain, Melissa Ho, Kevin Fall. Routing in delay tolerant networks with uncertainties[A]. submitted to Hotnets-III 2004[C].
- [20] Evan P C Jones, Lily Li, Paul A S Ward. Practical routing in delay-tolerant networks[A]. SIGCOMM'05 Workshops[C]. 2005. 22 - 26.
- [21] Randolph Y Wang, Sumeet Sobti, Nitin Garg, Elisha Ziskind, Junwen Lai, Arvind Krishnamurthy. Turning the postal system into a generic digital communication mechanism[A]. Proc. of ACM SIGCOMM 2004[C]. 2004. 159 - 166.
- [22] M Loubser. Delay Tolerant Networking for Sensor Networks[R]. Swedish Institute of Computer Science, SICS Technical Report T2006:01, January 12, 2006.
- [23] A Lindgren, A Doria, O Schel'en. Probabilistic routing in intermittently connected networks[A]. Lecture Notes in Computer Science[C]. 2004. 239 - 254.
- [24] W Zhao, M Ammar, E Zegura. Multicasting in delay tolerant networks: Semantic models and routing algorithms[A]. In Proceedings of the SIGCOMM Workshop on Delay Tolerant Networking[C], August 2005.
- [25] Deering S, Estrin D, Farinacci D, Jacobson V, Liu CG, Wei LM. The PIM architecture for wide-area multicast routing[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking. 1996, 4(2): 153 - 162.
- [26] Carlos de Moraes Cordeiro, Hrishikesh Gossain, Dharma P Agrawal. Multicast over wireless mobile ad hoc networks: present and future directions[J]. IEEE Network, 2003, 17(1): 52 - 59.
- [27] P Paul, S V Raghavan. Survey of multicast routing algorithms and protocols[A]. In: Proceedings of the Fifteenth International Conference on Computer Communication[C]. (ICCC 2002. <http://citeseer.ist.psu.edu/paul02survey.html>)
- [28] S Symington, R Durst, K Scott. Non-Custodial (Best-Effort) Multicasting Support in DTN[R]. draft-symington-bundle-multicast-noncustodial-00.txt, Submitted February 25, 2006.
- [29] K Scott and S Burleigh. Bundle Protocol Specification[R]. draft-irtf-dtnrg-bundle-spec-05. txt; work-in-progress, April 2006.
- [30] S Symington, R Durst, K Scott. Delay-Tolerant Networking Custodial Multicast Extensions[R]. draft-symington-dtnrg-bundle-multicast-custodial-00, August 1, 2006.
- [31] R C Durst. An Infrastructure Security Model for Delay Tolerant Networks[OL]. July 2002. <http://www.dtnrg.org>
- [32] V Cerf, S Burleigh, A Hooke, L Torgerson, R Durst, K Scott, E Travis, and H Weiss. Interplanetary internet(IPN): Architectural definition[OL]. May 2001. Available: <http://www.ipn-sig.org/reports/memo-ipnrg-arch-00.pdf>
- [33] K Fall, W Hong, S Madden. Custody Transfer for Reliable Delivery in Delay Tolerant Networks[OL]. <http://www.dtnrg.org>.
- [34] F Warthman. Delay-Tolerant Networks (DTNs)—A Tutorial[OL]. Version1. 1, forrest @ warthman. com, May 2003. <http://www.dtnrg.org/wiki/Docs>
- [35] V Cerf, S Burleigh, A Hooke, L Torgerson, R Durst, K Scott, K Fall, and H Weiss. Delay Tolerant Network Architecture[R]. draft-irtf-dtnrg-arch-02. txt, 2004.
- [36] S Burleigh, A Hooke, L Torgerson, K Fall, V Cerf, B Durst, K Scott, H Weiss. Delay-tolerant networking-an approach to interplanetary internet[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(6): 128 - 136.
- [37] V Cerf, S Burleigh, A Hooke, et al. . Delay-tolerant network architecture[OL]. Internet draft, draft-irtf-dtnrg-arch-03, Jul. 2005. <http://www.dtnrg.org/docs/specs/draft-irtf-dtnrg-arch-03.txt>.
- [38] A Pentland, R Fletcher, A A Hasson. A road to universal broadband connectivity[A]. 2nd Int'l Conf. Open Collaborative Design for Sustainable Innovation; Development by Design[C]. Dec. 2002. <http://courses.media.mit.edu/2003fall/de/DakNet-Case.pdf>
- [39] Wizzy Project.[OL] <http://www.wizzy.org.za/>
- [40] Z Zhang. Routing in intermittently connected mobile Ad hoc networks and delay tolerant networks: overview and challenge[A]. IEEE Communications Surveys & Tutorials[C]. 1st Quarter 2006. 24 - 37.
- [41] R Handorean, et al. Accommodating transient connectivity in ad hoc and mobile settings[A]. Pervasive 2004[C]. Vienna, Austria, 2004. 305 - 22.
- [42] S Merugu, et al. Routing in Space and Time in Networks with Predictable Mobility[R]. Georgia Institute of Technology, Technical Report, GIT-CC-04-7, 2004.
- [43] D Nain, et al. Integrated routing and storage for messaging applications in mobile ad hoc networks[A]. Proc. WiOpt[C]. Autiplus, France, Mar. 2003.
- [44] A Davids, A H Fagg, B N Levine. Wearable computers as packet transport mechanisms in highly-partitioned ad-hoc networks[A]. Proc. Int'l. Symp. Wearable Comp. [C]. Zurich, 2001. 141 - 148.
- [45] Z Chen, et al. Ad Hoc relay wireless networks over moving vehicles on highways[A]. ACM Mobihoc 2001[C]. 2001. 47 - 250.
- [46] W Zhao, et al. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile Ad Hoc networks[A]. Proc. 5th ACM Int'l.

Symp. Mobile Ad Hoc Net. and Comp. [C]. ACM Press, 2004. 187 - 98.

- [47] Y Wang, et al. Erasure-coding based routing for opportunistic networks[A]. ACM SIGCOMM DTN Wksp. [C]. 2005.

作者简介:



樊秀梅 女, 博士, 现北京理工大学副教授, 教育部 2007 年新世纪优秀人才入选者. 主要研究领域为计算机网络 QoS 控制、无线 Ad hoc 网络路由技术、容迟网络、网络性能评价.

E-mail: xmfan@bit.edu.cn.

陈 辉 男, 硕士生, 研究领域为计算机网络、DTN 路由.

E-mail: chenxi0989@hotmail.com



单志广 男, 博士, 研究员, 国家信息中心信息化研究部首席工程师, 兼规划研究室主任. 曾获 2005 年教育部提名国家自然科学一等奖. 主要研究领域为计算机网络、系统性能评价、Petri 网理论与应用.

E-mail: shanzg@mx.cei.gov.cn



张宝贤 男, 博士, 现中科院研究生院计算与通信工程学院教授, 博士生导师, 中科院 2006 年百人计划入选者. 主要研究方向: 无线传感器网络、无线 Ad Hoc 网络协议、算法设计、评价与评价. E-mail: bxzhang@gucas.ac.cn