

## 容迟网络的体系结构及关键技术

樊秀梅\*

[xmfan@bit.edu.cn](mailto:xmfan@bit.edu.cn)

(北京理工大学计算机科学技术学院, 北京, 100081)

**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路径和频繁分裂的网络。当端节点具有严格的能量和存储限制时, 问题将更加恶化。由于移动性和特殊应用缺乏“常常连接”的基础结构, 像陆地移动网络、军事无线自组织网络、星际网络及传感器网络这样的网络有它们自己的专有协议而不采用 IP 协议。为了实现这些网络之间的互联, 研究者们提出了在端到端连接和节点资源都受限时的一种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)。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信息可靠转发。本文综述和分析了容迟网络的应用背景、体系结构、关键技术和开放研究问题, 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、频繁网络分裂、覆盖网络

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号:

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

Fan Xiumei

(School of computer science and technology, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

[xmfan@bit.edu.cn](mailto:xmfan@bit.edu.cn)

**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 IP. To achieve interoperability between them, researchers have 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 discuss state-of-the-art architecture and key techniques for DTN and potential issues. It is our purpose to stimulate more research in this new emerging network.

**Key words:** Delay-Tolerant Networks, high delay path, frequently network disconnection, overlay network.

## 1 引言

TCP/IP提供了一种基于不同链路层技术的端到端通信机制, 已成为不同网络互联的基础。通常来说, TCP/IP协议簇的平稳运行依赖如下物理链路特性假定: 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断

\*本文受到国家自然科学基金(No. 90604012)与北京理工大学基础研究基金(No. BIT-UBF-200501F4209)资助。樊秀梅, 博士, 副教授。研究领域为计算机网络传输控制、无线网络、网络性能评价。

开(network partition/disconnection)而形成的<sup>[1]</sup>。下面是这类网络的几个典型例子。

- 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分离开。在一些情况下, 网络可能难以形成一条端到端的路径, 并且网络的分裂方式可以预测。例如, 一辆经常往返的公共汽车可以被用作信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, 它可以向附近的客户机(clients)和它将要往地点的远程机(remote clients)之间提供信息交换服务。
- 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。这些系统可能有中断可预言的高延迟 (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中。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分裂。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, 这将使得信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互联其他网络。

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、不存在端到端路由路径、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提出了严峻的挑战。

为使现有Internet体系结构和协议适应一些特殊环境, 研究者提出的一种方法是“链路修正法(link-repair approaches)”, 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的端到端可靠性和命运共享模式, 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)”, 它是将受限网络作为Internet的边缘 (edge), 通过特殊代理 (proxy agent) 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中存在的问题。

容迟网络体系结构是因特网研究任务组 (IRTF) 的容迟网络研究组 (DTNRG<sup>1</sup>) 在星际网络研究组 (IPNRG<sup>2</sup>) 基础上发展而来的, 最初是为行星间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, 31]</sup>, 是一种面向信息的可靠的覆盖层体系结构, 它是形成受限网络互联的适当方法。容迟网络提供异步信息传递的业务语义学, 可以和TCP/IP进行联合。容迟网络的设计主要是受传统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而形成的。

## 2 受限网络的特性

受限网络不同于现有的网络, 它具有如下几个特性<sup>[2]</sup>:

### (1) 路径和链路特性

- 高延迟, 低数据率 (High latency, low data rate): 端到端延迟表示在单向传输时每一跳的延迟总和。每一跳延迟是由通过每一链路时的传输时间、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, 传输率可能是比较小的 (例如大约 10kbps), 延迟可能是比较大的 (大约 1 秒或以上), 而数据率在很大程度上可能是不对称的 (例如一个较大的数据下行返回信道和较小的上行控制信道)。

<sup>1</sup> <http://www.dtnrg.org/>

<sup>2</sup> <http://www.ipnsig.org/>

对高延迟、低数据率的网络来讲，协议应尽可能的简单。这将减小往返时间和节约带宽。除此之外，协议中的动态控制功能应设计为开环或逐跳（hop-by-hop）形式。

- 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它原因造成的。由于错误而断开在传统网络中已有很多研究，这里就不再考虑。非错误（Non-faulty）断开频繁地出现在无线环境中，主要是由于移动和低占空比（low-duty-cycle）系统操作引起的。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，也是可以预言的。

- 长排队时间（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，排队延迟通常占主导地位。排队时间很少超过 1 秒（通常会更少），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，可能几天）。这就表明，信息可能必须被存储在路由节点相当长的时间，并且下一跳的选择可能作废（revoked）。也就是说，如果发现信息转发更好的路由器，消息就应当被传递到新的下一跳。

## （2） 网络体系结构

- 互操作性考虑（Interoperability Considerations）：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、且不能象 Internet 协议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（exotic）并且可能被过量订购的。链路能量是一个宝贵资源，数据转发应当被认证、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，端到端的安全策略不具有吸引力的两个主要原因是：第一，端到端方式一般要求一些端到端的密钥交换，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

- 有限的寿命（Limited longevity）：在一些受限网络（如无线传感器网络、军事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，那么一个特殊信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信息递送。因此，可靠传送的责任应当被委派给一些其它设施，并且任何成功或不成功传输的通知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）。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命，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，通常预先规划正常的运行时间，断开影响路由由协议的操作。当然，在空闲期间发现一个新节点加入网络是一个问题，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。

- 有限的资源（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，一个存储能力有限的传感器被禁止收集更多的数据，因为它的存储被正在传输中的数据全部使用。除此之外，端节点还需要至少保持 RTT 时间的重传缓存。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，特别是在收到其它异步信息或监测到一些突发事件发生时尤其严重。这表明，



如果在网络设计时考虑可靠性，端节点应当采用一种尽快清空队列的重传机制，不需等待端到端的确认。

### 3 容忍延迟的面向信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>，试图在这种网络上修改、加强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，但在其它时候支持挑战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“容忍延迟的面向信息的覆盖层体系结构”。

容迟网络体系结构（DTN）是基于信息（message）交换的，其体系结构如图 1 所示。DTN的数据单元可能是信息、分组或“束（bundles）”。一些信息聚合在一起传递被称为“束”<sup>[3]</sup>，处理它们的路由器被称为“束转发器（bundle forwarders）”或DTN网关。Burleigh等提出了一个新的端到端覆盖层网络协议<sup>[32]</sup>，称为“捆绑（bundling）”。

在DTN网络中有一些新的概念和术语，主要有如下一些<sup>[1]</sup>：

#### (1) 区域和 DTN 网关（Regions and DTN Gateways）

DTN 体系结构包括区域和 DTN 网关概念。如果两个节点可以不通过 DTN 网关进行通信，那就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。如图 1 所示例子中有四个区域，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旋转的卫星链路（LEO）。

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，且当一个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<sup>[4]</sup>的“waypoint”概念和初始ARPANET中的网关定义<sup>[5]</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网关采用可靠的信息路由代替了“best-effort”的分组交换。当要求可靠传输和将全球命名转换为本地名称时，DTN网关将信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。

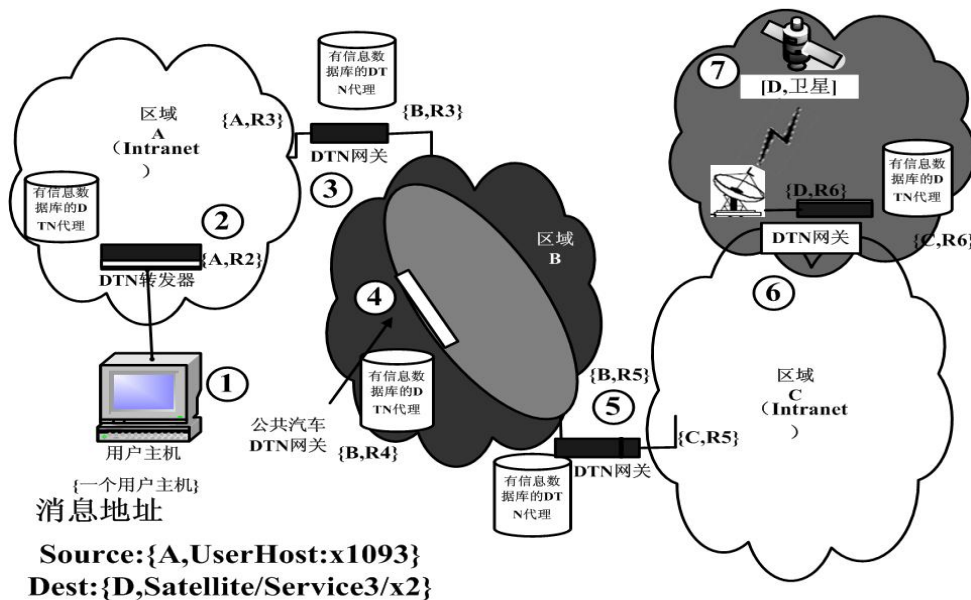


图 1: DTN 体系结构

#### (2) 名称数组（Name Tuples）

为了支持 DTN 信息的路由，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}。区域名是全球唯一的，是通过分级构建的，它具有拓扑意义。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。

当一个信息传输经过一个长的、异构区域集合时，仅仅用区域名来路由。在到达目的区域边界时，如果必要，实体名信息被翻译成本地适用的协议标准名（或地址）。这种解析名字的方法导致一个“late binding”

的形式。DTN 的“late binding”和 DNS 式的 Internet 命名和地址是不同的：一个端到端的 Internet 会话所需的 DNS 处理是在会话开始进行的。

(3) 一个邮政服务类型 (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CoS (class of service) 结构。在DTN中采用美国邮政服务中服务类型子系统作为DTN中的bundle CoS，主要提供保管转发、收到回复、保管转发通告、转发信息通告、递送优先级和认证六类CoS服务<sup>[30]</sup>。

(4) 路径选择和调度 (Path Selection and Scheduling)

在 DTN 网络体系结构下，不能假定端到端路径是存在的。实际上，路径是由与时间相关的一系列联系 (contacts) (通信时机) 组成的，用来将信息从源点移动到目的点。联系与连接开始/终止时间、容量、延迟、终点及方向这些参数相关。路由预测存在于从完全可预测 (例如，有线连接或一个相位、频率已知的无线定期连接) 到完全不可预测 (例如，一个移动信息路由器已经进入另一个 DTN 节点的可连接范围内的偶然性联系) 的连续范围内。

给定面向信息的系统、传输的优先级、路由要求和链路容量可用来解决多流优化问题中信息分配路径和传输时间的优化。这类问题是众所周知的 NP-hard 问题。指定区域的路由协议和算法严重影响到路径选择和信息调度的细节问题。在 DTN 发展的早期阶段，已经确定了一些有趣的问题，包括存在和可预言联系的问题、假定高延迟的未定信息的状态知识、有效分配信息去联系和确定它们传输顺序问题。这些问题是很有意义的，也是以后研究的问题。学术界针对这些问题已经提出了一些启发式方法。

(5) 保管传递和可靠性语义学 (Custody Transfer and Reliability Semantics)

DTN 体系结构包括稳定点 (P) 和非稳定点 (NP) 两类信息路由点。假定稳定点可以容纳一些稳定信息存储，而非稳定点不行。除非不能或不想去存储一些特殊信息，稳定点使用保管传递 (Custody Transfer)。保管传递指的是信息从一个 DTN 跳到下一 DTN 跳，并且能可靠地传递。保管传递是为了保持端到端连接状态并抵抗高丢失率和资源缺乏而提出的概念。

在研究从端到端可靠传输到跳到跳可靠传输中，研究者发现跳到跳的传输可靠性并不比端到端可靠性差。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。

(6) 协议转换和集中层 (Protocol Translation and Convergence Layers)

在一些包含 DTN P 节点的区域中，一些传输协议可能提供或不提供以下机制：可靠传递、连接 (有连接失败提示)、流量控制、拥塞控制和信息分界。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信息边界，所以缺乏这些特性的传输协议应当得到扩展。图 2 表示了捆绑转发器的执行结构，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。

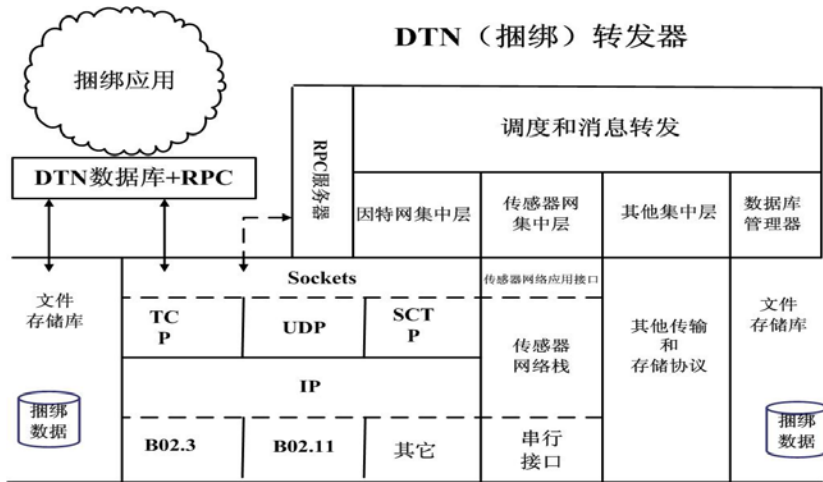


图 2: DTN 转发器的结构

### (7) 时间同步

DTN 体系结构要求通信实体之间的时间同步。这种要求起源于挑战环境中许多分布式应用需要时间同步,且要求使用 DTN 方法去调度、选择路径和拥塞管理。尽管这里的同步要求比 Internet 更加复杂,但我们相信一定会得到解决的。时间同步的需要是基于许多挑战环境的共同特性提出的。

### (8) 安全

DTN 体系结构的安全模型不同于传统的网络安全模型。大多数安全方法包括两个网络用户的相互认证和秘密数据交换。DTN 感兴趣的是可认证地接入到一个特殊业务类型的业务流中,并且避免携带被发现禁止的长距离业务流。

为了实现安全模型,每个信息包括一个不变的“邮戳(postage stamp)”来保持发送者标识、一个和信息相关的请求 CoS 的批准、及其它密码方法来校验信息内容的正确度。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。

在第一个 DTN 路由器,一个公钥被用来验证发送者,并再次请求 CoS,然后被接收信息被重新标上路由器密钥后进行传输。使用这种方法,只有第一跳路由器需要缓存每个用户证书,并只为邻近用户服务。非边缘的核心(core)路由器可以依赖于上游路由器来校验信息的真实性。这种方法将有助于改善这些网络密钥管理的可扩展性,但也限制了路由器公共密钥证书的数量。

### (9) 拥塞控制和流量控制

作为一个跳到跳体系结构,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,并可以确保信息的可靠传递。

和其它体系结构相比,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,连接可能在将来的一段时间不能到达(如此累积的数据可能在不久的将来没有机会传出去);第二,已经收到的保管信息除非在极端情况或过期后不能被丢弃。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信息,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,要避免非保管信息传输。

拥塞控制机制可以分为主动和被动两类。被动(Proactive。。。这个应该是主动的, reactive 是被动的)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,任何过期的信息都将被安全丢弃。如果被动方式是不够的或不可用时,则就需要使用主动(Reactive)方法,这将使得性能下降。对 DTN 来说,可能的主动方法包括预留缓存空间作为 CoS 功能、当缓存空间满时拒绝新信息的连接输入、安排保管传输到一些不是最理想下一跳的可选管理人中、为了保管传输的捆绑要求而丢弃非保管捆绑。

如前所述,DTN 体系结构是使用信息(message)作为基本数据交换单元的覆盖层网络。使用这种体系的应用不能期待及时的响应,并且当请求/响应的往返时间超过客户机和服务器处理的期待寿命时有能力操作。另外,应用必须能够处理名字域和它们的注册、CoS 详细说明及认证信息。捆绑转发器必须执行应用接口,它具有绑定路由和转发功能、一致性信息存储功能、时间同步和传输协议汇聚层。应用接口是非模块化的,并且包括捆绑应用和本地捆绑转发代理之间的注册和复查功能。一般来说,所有绑定应用在面临重启或网络分割时应当没有困难地被组织操作。

一个 DTN 系统原型已经在 Linux 操作系统下被开发,它实现了应用接口、对“预定连接”和“一直连接”的捆绑转发、探测新联系和丢失的联系、和两个汇聚层(像基于绑定代理的 Berkeley 尘埃网络中的 TCP/IP 一样<sup>[6]</sup>)。DTN 捆绑转发器大约有 22K 行 C 程序代码形成,目前使用 SUN 公司的 RPC 库和应用接口,使用 SleepyCat™ 数据管理软件来稳定存储信息元数据。系统原型作为整个的体系已经被使用,并且已显示了它提供的非交互式可靠信息服务的一般效用。

图 3 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代理压缩这些阅读信息到DTN信息中 (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信息中积累, 即使在周期性断开时也没有丢失。照相机受一个与DTN连接的图象捕获程序的驱动——CFDP<sup>3</sup>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, 它被用在地球和空间站之间的移动文件的空间通信上。

数据试验的结果是根本上定性的, 支持上面提出的体系结构的期望和设想。

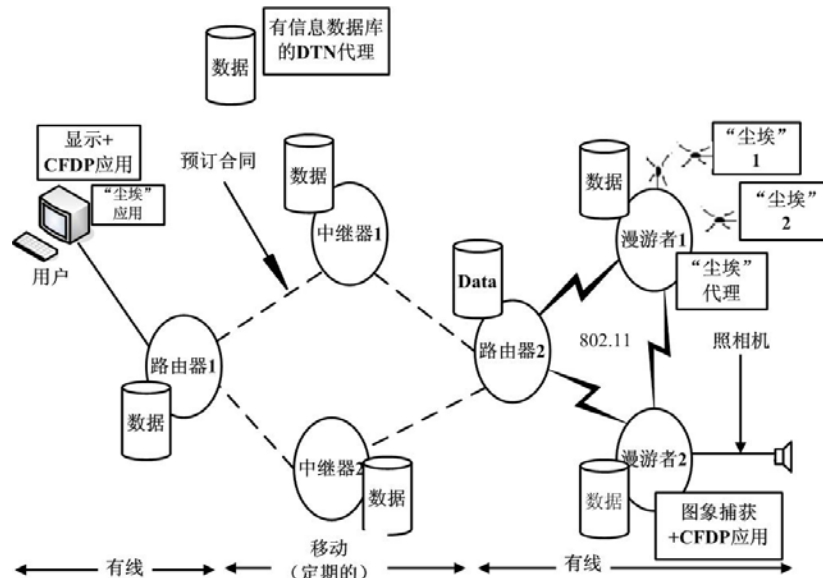


图3. 实验环境中的拓扑原型图

#### 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>[3]</sup>而设计的。它描述了一个有意义的进化发展, 主要是针对以前在如下领域中的工作: (1) 网络路径的类型, 连接已经被推广为包括不可预知的联系; (2) 不同网络的汇聚层的形式已经产生; (3) 安全模型已经被更加谨慎地定义; (4) 服务分类模型已经简单化; (5) 一些传输的付费概念已经升级。

在频繁处在不连通网络中的路由技术方面, 已经出现了一些研究成果。在ZebraNet<sup>[7]</sup>中, 当动物走进基站覆盖区域时, 放置在动物身上的无线传感器节点可以上行汇报其位置信息和它们的一些信息<sup>4</sup>。在DataMules<sup>[8]</sup>中, 如果在传感器部署区域行走的“mule”能够定期地访问传感器节点, 并且提供非交互式的信息存储转发服务, 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>[9]</sup>主要针对移动Ad-hoc网络上运行IP机制。DTN在网络断开期间可以采用这种模式。[10]主要针对使用名字路由 (name-based routing, correct) 来提供Internet上的内容分发, 提高其可扩展性和性能。体系结构的协同性和分层思想主要参照ARPANET/Internet<sup>[5,11]</sup>。DTN网关在许多方面和Internet路由器是相似的, 并且自适应地工作在高延迟和断续连接的网络中。

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、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。

##### (1) DTN 的路由技术

在SIGCOMM2004 年会中, Sushant Jain等人首次提出了DTN网络中的路由问题<sup>[12]</sup>。该文明确提出了DTN路由问题的主要问题和表达形式。Jain等人认为DTN路由就是确定信息如何在端到端地穿越一个随时

<sup>3</sup> CFDP: CCSDS File Delivery Protocol (CFDP), 空间数据传递委员会规定的文件传递协议。

<sup>4</sup> <http://www.princeton.edu/~mrm/zebranet.html> .

间变化的连通图,且这种动态性是可能预知的。另外,[13,14,8]研究了当网络拓扑的动态性不可预知时,如何在无线传感器网络/移动Ad-hoc网络中提供连接的方式方法。

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>[17]</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。针对不连接网络最早提出的一种路由方式是流行性路由(epidemic routing)<sup>[18]</sup>,它通过节点间以随机交换的方式复制信息,直到节点(哪个节点?)有每一个信息的拷贝。[12]首次提出一个如何在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信息,但由于环路或缓存耗尽时可能丢弃数据。在[15]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、路径选择少等因素而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信息的DTN路由协议<sup>[16]</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[19]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信息。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,他们交换自身的总信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、评估传递性能和管理缓存等技术。

## (2) DTN 的组播技术

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>[21, 22, 23]</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,并且需要高效组通信网络技术支持。但是由于DTN网络的频繁隔离特性使得DTN中的组播技术是一个有挑战性的难题。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>[20]</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,并已得出了一些研究成果。Symington等人提出了DTN网络中的非保管(Non-Custodial (Best-Effort))组播方案<sup>[24]</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>[25]</sup>以非保管的方式传递一个捆绑包到多个目的节点,而不为每个目的节点独立发送一个捆绑包。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<sup>[25]</sup>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>[26]</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) DTN 的安全技术

在DTN中的安全问题不同于现在网络的安全,有它自身的特殊性。DTN网络基础结构的保护和接入基础结构控制都是相当重要的。[27]讨论了DTN中的一些强制约束(如:xxxx、xxxx等),并提出了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,一个预期用户想要使用DTN服务,就必须用证书注册它的公共密钥,并且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的标记过[对么?]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信息,它就产生一个用它自己私钥的新签名加在信息上进行传递。

大多数网络安全方法试图去认证用户的身份和信息的完整性,而不认证转发信息的路由器。但在DTN中,转发节点(路由器或网关)也需要被认证<sup>[30]</sup>。

## (4) DTN 的传输协议

DTN体系结构提出了面向信息的存储转发覆盖层方法以处理挑战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(Custody Transfer)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>[28]</sup>,Fall等人在文献[29]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。节点是否接收信息并进行保管取决于该节点的当前资源、路由情况、信息的优先级、信息大小、剩余信息生存时间、安全情况及本地策略限制等因素。在网络中传输的信息也可



能被分段和重组。

在信息传输中如果出现 DTN 网络拥塞，其主要解决方式是丢弃超时信息和没有接收保管的信息，对已经接收保管的信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信息可靠传递的责任从一个节点转移到另一个节点，始于源节点，终于目的点。在 DTN 协议头字段中，信息（或信息片段）显示它们目前的保管代理人，而当信息从一个保管代理人移动到另一个保管代理人时，该字段被更新。

## 5 DTN 研究的发展趋势和应用前景

DTN 是对 Internet 体系的一个根本改变，而不仅仅是修补，它采用了一系列不同于 Internet 的设计：信息代替分组、可靠安全的 hop-by-hop 代替 end-to-end、基于名称的路由代替基于地址的路由、部分连接网络图代替全连接网络图。DTN 可以容易地覆盖在基于 TCP/IP 的 Internet，并保持兼容。

DTN 有许多潜在的应用，比如星际网络（inter-planetary network，IPN），斑马研究网（Zebanet），DataMule，和乡村网络（village networks）<sup>[33]</sup>等。

DTN 用于在端到端连接和节点资源都有限时的一种网络体系结构和应用接口，以满足随意的异步信息的可靠传递。设计有效的 DTN 协议的主要挑战是非常长的延迟（有时长达几天）、频繁的中断、和随机的或可预言的连接。DTN 的广泛研究将为军事战争、航天通信、灾难应急等领域的信息交流提供有力的科学理论和技术支持，将极大推进未来网络通信智能化、泛在化、融合化的发展趋势。

## 参考文献

- [1] Kevin Fall, "A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets", in *Proceedings of SIGCOMM'03*, Aug. 2003.
- [2] R. Durst, G. Miller, E. Travis, "TCP Extensions for Space Communications", *Proc. MobiCOM 1996*.
- [3] V. Cerf et. al., "Interplanetary Internet (IPN): Architectural Definition", Available as <http://www.ipnsig.org/reports/memo-ipnrg-arch-00.pdf>
- [4] John Wroclawski, "The MetaNet: White Paper - Workshop on Research Directions for the Next Generation Internet", Available from <http://www.cra.org/Policy/NGI/grouppapers.html>, May 1997.
- [5] V. Cerf, R. Kahn, "A Protocol for Packet Network Intercommunication", *IEEE Trans. on Comm.*, COM-22(5), May 1974.
- [6] Jason Hill, Robert Szewczyk, Alec Woo, Seth Hollar, David Culler, Kristofer Pister. "System architecture directions for network sensors". *Proc. ASPLOS*, 2000.
- [7] P. Juang, H. Oki, Y. Wang, M. Maronosi, L. Peh, D. Rubenstein, "Energy-Efficient Computing for Wildlife Tracking: Design Tradeoffs and Early Experiences with ZebraNet", *Proc. ASPLOS 2002*, Oct. 2002.
- [8] R. Shah, S. Roy, S. Jain, W. Brunette, "DataMULEs: Modeling a Three-tier Architecture for Sparse Sensor Networks", to appear, *IEEE SNPA Workshop*, May 2003.
- [9] C. Perkins, ed., "Ad Hoc Networking", Addison Wesley, 2001.
- [10] M. Gritter, D. Cheriton, "An Architecture for Content Routing Support in the Internet", *Proc. Usenix USITS*, March 2001.
- [11] D. Clark, "The Design Philosophy of the DARPA Internet Protocols", *Proc. SIGCOMM 1988*.
- [12] Sushant Jain, Kevin Fall, Rabin Patra, "Routing in a Delay Tolerant Network" *SIGCOMM'04*, Aug. 2004.
- [13] X. Chen and A. L. Murphy, "Enabling Disconnected Transitive Communication in Mobile Adhoc Networks", *In Workshop on Principles of Mobile Computing*, August 2001.
- [14] A. Vahdat and D. Becker, "Epidemic Routing for Partially-connected Ad hoc Networks", *Technical Report CS-2000-06*, Duke University, July 2000.
- [15] Ting Liu, Sushant Jain, Melissa Ho, and Kevin Fall. "Routing in Delay Tolerant Networks with Uncertainties." *submitted to Hotnets-III 2004*.
- [16] Evan P. C. Jones, Lily Li and Paul A. S. Ward, "Practical Routing in Delay-Tolerant Networks", *SIGCOMM'05 Workshops*, August 22-26, 2005.
- [17] Randolph Y. Wang, Sumeet Sobti, Nitin Garg, Elisha Ziskind, Junwen Lai, and Arvind Krishnamurthy. "Turning the Postal System into a Generic Digital Communication Mechanism". *Proc. of ACM SIGCOMM 2004*. August 2004.

- [18] A. Vahdat and D. Becker. "Epidemic routing for partially connected ad hoc networks". Technical Report CS-200006, Duke University, Apr 2000.
- [19] A. Lindgren, A. Doria, and O. Schel'en. "Probabilistic routing in intermittently connected networks". *SIGMOBILE Mobile Computing Communications Review*, July 2003.
- [20] W. Zhao, M. Ammar, and E. Zegura, "Multicasting in delay tolerant networks: Semantic models and routing algorithms," in *Proceedings of the SIGCOMM Workshop on Delay Tolerant Networking*, August 2005.
- [21] S. Deering, D. Estrin, D. Farinacci, V. Jacobson, C.-G. Liu, and L. Wei. "An architecture for wide-area multicast routing". In *ACM SIGCOMM1994*, 1994.
- [22] Carlos de Morais Cordeiro, Hrishikesh Gossain, Dharma P Agrawal. "Multicast over Wireless Mobile Ad Hoc Networks: Present and Future Directions", *IEEE Network*, 2003; 17 (1).
- [23] P. Paul, S. V. Raghavan, "Survey of multicast routing algorithms and protocols", in: *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Computer Communication (ICCC 2002*. <http://citeseer.ist.psu.edu/paul02survey.html> )
- [24] S. Symington, R. Durst, and K. Scott, "Non-Custodial (Best-Effort) Multicasting Support in DTN", draft-symington-bundle-multicast-noncustodial-00.txt, Submitted February 25, 2006.
- [25] K. Scott, and S. Burleigh, "Bundle Protocol Specification", draft-irtf-dtnrg-bundle-spec-05.txt, work-in-progress, April 2006.
- [26] S. Symington, R. Durst, K. Scott, "Delay-Tolerant Networking Custodial Multicast Extensions", draft-symington-dtnrg-bundle-multicast-custodial-00, August 1, 2006.
- [27] Robert C. Durst, "An Infrastructure Security Model for Delay Tolerant Networks", July 2002.
- [28] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, E. Travis, and H. Weiss, "Interplanetary internet (ipn): Architectural definition", May 2001. Available: <http://www.ipnsig.org/reports/memo-ipnrg-arch-00.pdf>
- [29] Kevin Fall, Wei Hong, Samuel Madden, "Custody Transfer for Reliable Delivery in Delay Tolerant Networks"
- [30] Forrest Warthman, "Delay-Tolerant Networks (DTNs)—A Tutorial", Version 1.1, [forrest@warthman.com](mailto:forrest@warthman.com), May 2003.
- [31] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, K. Fall, , and H. Weiss, "Delay Tolerant Network Architecture." draft-irtf-dtnrg-arch-02.txt, 2004.
- [32] S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, K. Fall, V. Cerf, B. Durst, K. Scott, and H. Weiss, "Delay-Tolerant Networking – An Approach to Interplanetary Internet," *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 6, pp. 128–136, 2003.
- [33] A. Pentland, R. Fletcher, and A. A. Hasson, "A Road to Universal Broadband Connectivity," *2nd Int'l Conf. Open Collaborative Design for Sustainable Innovation*; Development by Design, Dec. 2002.