延迟/中断可容忍网络的研究现状以及未来的挑战

摘要

富有挑战性的环境中的网络，或如现在更普遍的提及到的称作延迟中断可容忍网络，在近几年已经引起了网络研究团体的高度重视，连接中断，有限的网络容量，受参与其中的移动设施的能源，存储空间约束，节点任意移动，这只不过是协议栈不得不处理的很小一部分挑战。

在本文中，我们首先给出了DTN问题的陈述；我们主张并不是所有的应用对系统都有相同的需求，因此，对所有的数据包都采取相同的（盲目的）措施会降低网络的效率。在此基础上，我们提出了对DTN协议的设计理念，其中规定协议设计必须主动以应用需求为基础上完成。

之后我们上从架构和应用的角度下到新兴DTN协议栈的传输层和网络层，调查了延迟中断可容忍网络这整个领域中最新的技术贡献。我们发现虽然在大多数情况下没有明确的提到，但是设计上的定位引领着研究的趋势。据我们所知，这是在如此广泛的范围讨论和评估研究贡献的第一手资料，最后，我们强调一下这次研究上的挑战以及对悬而未决的问题需要进一步的调查。

# 简介

延迟中断可容忍网络一词起源于IPN网络，由于经历过在我们的太阳系中不同星球之间数据传输极高的延迟，研究人员和科学家认别出了陆地和星际传输的不同之处：应用于深空通信的算法和协议必须能够容忍延迟。此外，由于高误码率以及在这种环境中长期的连接中断，研究领域还必须涉及到“中断”。

之后，网络研究协会发现了在陆基（或陆地边缘）网络也能部署延迟中断可容忍网络的可能性（图1）。这一新的研究领域最近吸引了众多的目光，主要是因为它富有挑战性的特征。间歇连通性，高灵活性，未知传输机动模式，能量和存储空间消耗只是DTN环境下可能遇到的极小的一部分潜在问题。

DTNs 集中体现在一个单独的研究领域，直到现在在此领域中所有问题都被网络研究协会关注着。举个例子，路由选择相对于拥塞控制是一个不同的研究课题；应用设计从底层传输或路由协议及原则中分离开；路由协议无需考虑缓存管理以及排队问题。这些课题都会单独考虑。

在DTNs中这样的规则和假设不得不重新考虑。DTN节点可能由强有力的笔记本电脑群组成，也可能由微型传感器组成。资源的差异显然会对相应节点上的能量和存储资源产生巨大的影响。此外，在终端到终端连接断开的情况下，使得做出是否路由转发和资源预留的这样的决定变得更难。总的来说，已经针对无线自组织网络和网状网络对这些问题进行了研究，但同样的，在这样的环境下当数据发生转移时假设终端到终端是存在连接的。

针对DTN相关问题的研究已经扩大并覆盖了很广泛的各种各样的环境。举个例子，IRTF DTN研究小组主要将精力集中在深空通信和捆绑协议上（这项成果预计也将部署在一些路基环境中），而更广泛的DTN研究团体已经为发展中国家，车辆网络，社交网络研究了延迟容忍通信，在此仅列举几个。显然，不同的应用环境之间存在着巨大的差异性，这种差异同样存在于参与的DTN节点以及其有效的资源。例如，对深空通讯而言，视距倍数（连接性同理）都是之前已知的,因此路径选择并不是争论点，更多的是调度和资源分配的问题，尽管如此，应用制度和服务对象还是会相应性的改变。

在这项研究中，我们认为应该正式的建立一个框架以用来对在不同的部署环境中的DTNs进行分类；这个框架还应该包括每个工作环境的相关基础性质还有它相应的应用。在此基础上，研究人员集中精力考虑具体的算法以优化相应的性能。例如，深空网络相对于车辆DTN有不同的需求和不同的目标。相反的，车载DTN在架构和基础设施层面上跟水下DTN有很明显的区别（图1）。显然的，每个DTN网络中相应的应用程序和他们的目标也相差很大。在此基础上，我们赞同《延迟可容忍网络研究的推进》一书的作者。这些作者提出并尝试解答有关于延迟可容忍网络研究的适用性，可行性，逻辑性及其部署情况的问题。其中，作者认为在这个新的网络研究得出显而易见的结论之前我们需要宽容对待之。我们试图扩大考虑因素，以添加所需的怀疑到DTN研究的诸方面，但在一个更广阔的视角，主要的成果以及这篇论文的结构如下：

1. 起初在第二章，我们提出DTN协议设计者应该采用下行分析法来解决问题（也就是如同我们从应用层角度观察一样）。也就是说，给定延迟中断可容忍网络独特的特征，我们主张不同的以用有不同的需求。
2. 接下来在第三章，我们区分了服务目标和系统约束。服务对象包括传输比率和传输延迟，而系统约束是指储存空间和能源利用率。我们研究的就是如何权衡上述提到的系统属性并猜想高传输率必导致高延迟，反之亦然。在我们猜想的基础上，我们提出了一种DTN算法设计主张，我们的主张认为高传输率需要严谨的推送决定，而低传输延迟需要大量的资源消耗。我们认为DTNs协议一定要设计成以服务目标为主导的方式。
3. 我们调查了最近有关于DTN协议栈所有方面的比较重要的研究成果，在第4,5,6,7章中，我们分别讨论了架构方案以及应用层、运输层和网络层上的建议。架构（paper map）如图二所示。我们评估了相关的研究，发现他们的设计角度大多跟随着我们的设计思路，不管是隐式还是显式的。
4. 最后，在第八章中，我们讨论了延迟中断可容忍网络研究中遇到的挑战。我们试图解答最近一些研究组织提出的疑问并反驳DTNs无用论。更有甚者提出随着3G网络的发展，我们已经进入了网络无处不在的时代，因此没必要再进行机会网络研究。此外我们还讨论了不稳定网络（challenged network）中致命应用相关问题。

据我们所知，这是第一份试图检验DTN所有领域并试图以一个整体来解决DTN研究中已知问题的报告。虽然如[9]所提的研究已经提供了一个关于DTNs具体方面的很好的背景，我们认为在进行大规模部署之前还需要一次更加彻底的研究。

# 问题描述

很显然的，在DTNs不同的应用场景之间存在着很大的差异性。所以可能产生的挑战性问题是：“一个协议栈能否应用于所有的潜在DTN应用环境。”例如：网络中应用的多样性由同类共有的TCP/IP协议栈控制，创新主要进行于应用层。然而，在陆基网络中，在大多数情况下可以考虑为持续连通性，由于快速的回应以及紧凑的闭环控制回路，所以延迟非常小。但在DTN中，情况就不同了：连接更多的是异常而不是规则和控制回路，例如终端到终端连接和源到目标的路径不是封闭的。因此，在数据传递期限方面及时性是很难满足的。

此外，在数据传输率方面并没有定论百分之百的可靠性是必须的。例如，虽然像遥控，email这样的应用可靠的传输是必须的，但对于遥感和公路交通管理情况就不同了，举例：如果（非关键的）遥感数据包以秒为单位来搜集，一个或更多的数据包丢失不太会对监视结果产生什么重大的影响，相反的，如果尝试为遥感应用提供充分的可靠性可能对系统的整体性能产生负面的影响。试想，遥感数据包序列被困在DTN网络一部分中。这些信息将不断地消耗宝贵的网络资源（即，存储空间），反之，此节点将由于存储空间不足而无法去服务新的节点和程序。我们试图将一些可以预见的DTN应用放置在传输比率-传输延迟设计空间中，如图3。

由于DTN网络中杀手级应用还尚未被发现，我们先选择一些过为人质的应用，但DTN应用级应用还是为了说明所需的差异化服务。Email需要100%的传输可靠性，但对传输延迟要求不是那么严格。相反的，如果数据传输超过了相对的严格交付期限那么移动网络或非关键遥感数据将变得无用。

对以上的应用采用类似的策略有可能消耗光系统能量当电子邮件泛滥时，或者用光系统的存储空间当对非关键的遥感数据采取可靠传输的话。例如，我们认为整体的一式通用的DTN协议将会产生死锁，类似于前一段时间研究协会在传统互联网上所遇到的情况（如，老鼠对大象）。相反的，积极地，服务目标为主导的设计有可能根据需求提供供应，而不是根据供应调节需求，被动的修补程序。

# 解决方案框架

我们认为存在两个终极目标DTN系统应该努力实现：（i）（高）传输比率，DR，（ii）（低）传输延迟，DD。我们将这两个目标称为DTN系统的服务对象。鉴于DTNs主要由移动设备，电池供电设备组成，我们受限于以下方面：（i）电池消耗，E和（ii）储存空间，S。我们称这些限制为系统限制（如图四）。

尽管绝大多数对于DTNs的研究涉及到可靠性（以传输比率而言）和延迟（以传输延迟而言），他们用这些方面来评估自己所提议的算法的效果。换言之，可靠性和传输延迟被用为度量标准。这片论文新颖的就在于可靠性和传输延迟将不再作为评估指标而是被视为目标[10]。因此，我们应该主动前摄性的推动DTN协议的设计，而不是被动的测量协议的效率。

[10]中，我们讨论并分析了有关于DTNs的最近文献的观察结果。通过一系列的概念步骤和共识声明，我们推测：“鉴于系统受能源和储存的限制，同时实现DTN系统的高传输率和低传输延迟或不可能，亦或至少非常难”。在此基础上，我们提出了以服务目标为主导的协议工程/设计。我们的提议是建立在这两个设计理念声明上的。我们将在下文中概括我们的设计理念声明，我们一并建议读者在[10]中了解更多的细节。

3.1 设计理念

传统的网络应用通常同时需要高传输率（可靠性）和低传输延迟，因为这的确是可能的。然而，在DTN环境中，建宇上述提及的系统限制，我们可能不得不将服务目标之一定位的可操作性高。我们的设计提议可以大致归纳到如下的理念声明：

理念1。为了达到高传输率，人们必须做出明智的决定。这里明智的决定主要指的是对系统资源的保护，特别是指能源和存储空间。虽然存储空间在运行时是可再生资源（即，一旦确认信息被丢弃，存储空间就变得重新可用了。），以上说法不适用于能源，一旦可用能源用光，要不设备待机，要不需要重新充电。因此，我们主张为了增加传输概率，要不提高能源效率，换言之要不减少传输量到尽可能小，即使以传输延迟为代价。

理念2。为了实现低传输延迟，我们不得不接受一定程度的风险。有风险的转发决策可能使得我们无法预测到达目的地的概率有多高。但是，为了找到最快的可能路径，我们不得不分发副本给相对来说数量较多的节点，以期望至少其中之一能够在期限内达到目的地。

* 1. 讨论

基于上述，我们认为，对于DTNs算法的设计必须以所要求的性能结果（即，服务目标）为基础。也就是说，即使传统DTN指标，例如传输延迟，表现出良好的性能，也要与相应的运行在系统中的应用一同评估得出结果。以不同的方式来说，如果 一个系统/节点消耗了它所有的能量以尽可能的快来传输邮件信息，那么这应该被视为一种更多的浪费，而不是成功，因为这个系统/节点即将变得无用，确切的毫无原因。有兴趣的读者可以在[10]中找到阐明了以上所讨论的工作情景。

据我们所知，这是对基于需要的性能结果相关文献的评估与评判的第一手研究，而不是仅仅立足于相关算法性能。尽管目前有诸多有意思的研究，例如[11]，这些研究详细阐述了延迟可容忍网络的性能权衡，但这些研究都没有提供一个考虑到系统限制的对相关性能算法的系统性分类。例如，[11]中作者分析了在富有挑战环境中传输延误和资源消耗间的权衡关系。尽管他们的研究方法确实很有意思，研究模式看上去也很有前途，但是那些研究存在一些缺点。比如，作者并没有考虑到传输可靠性相关问题：设想的模型如何说明高送货率？进一步讲，研究者设计了一个相当不现实的假设。尤其是他们假设一旦数据包成功传送到目的地，所有参与的节点都获知了事实并从其储存中消除这些保留的数据包。很显然，我们需要这样的一种算法/技术可以提示剩下的节点数据包的传输情况。否则这些节点将不可避免地内存溢出。

在这篇论文的剩下部分，我们探讨了延迟可容忍网络的最新的相关研究。根据下行分析法的协议栈将相关文献分类如下：（i）构架或实施方案以及相应的原型（第四部分），（ii）DTN应用层协议（第五部分），（iii）传输层网络（第六部分）以及（iiii）路由/转发和网络层问题（第七部分）。

无论什么时候，我们评价研究方案都依据第三部分的设想。尤其是我们试图判断我们的设想是否与目前DTN研究趋势相适应。我们发现在诸多案例中，研究人员往往做出增长的传输率以传输延误为代价的结论，反之亦然。这个结论证明了我们3.1所说的设计理论声明的有效性。

# DTN体系结构

本章中，我们探讨的是关于DTN研究中的架构问题。我们首先从星级互联网和IETF官方文件即RFC 4838和它的所支持的捆绑协议规范，RFC5050，由IRTF DTN研究小组（DTNRG[1]）制造的DTN架构谈起。接下来的4.2章节中，我们提出了针对路基挑战环境下的原型实现，并最终在4.3章中，我们讨论了路基DTNs增强架构。

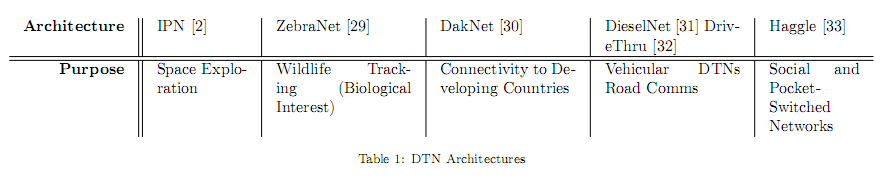
4.1 深空网络，DTNRG和捆绑协议

延迟可容忍网络最初的提出是为了提供一种方法使得星级网络能够成为一种可行的网络环境。研究人员把精力集中在不同星级网络之间的互联。其目标是实现一个网络中的通用网络。因此，大部分精力放在了互联和协同性问题上了。束层自身的定义以及有关于密闭传输，命名和编制方案，中间节点存储转发能力的转发能力。在早期的研究中[14],作者处理有关于挑战性环境中的网络协议设计的重要问题，总体来说，我们建议形成的DTN架构应该能够覆盖到包括了所有潜在的富有挑战的环境。这篇论文提出了一种DTN架构，在之后的官方文件中，大多数情况下已经形成了基础，如RFC 5050[13]。然而，在[14]中讨论的大多数问题和IRTF DTN研究小组一样仍然保持不变。举例来说，如路由选择和存储溢出这样的问题到目前为止并没有受到太多的关注，在深空任务中出现这样情况的原因是连接次数以及路由路径是预先知道的，而且总网络非常分散，和柱状连接以及少量的中继节点。

相比而言。**DTNRG**(延迟容忍网络研究组织)研究过安全性和传输层问题，但是往往是在宇宙通信领域【15】【16】【17】【18】【19】【20】【21】【22】。我们认为DTNRG主要关注的是行星间的DTN环境，没有接触过其他领域的DTN问题。也就是说，Bundle 结构和它的支持协议基于这样的现实:深层太空的网络状况是提前知道的，主要关注提高的数据传输率（在PROPHET【23】中出现例外，这也是DTNRG中唯一一个路由协议）。我们不认为情况总是如此。尤其是当我们谈到陆地的DTN部署时，在这种情况下，更高的数据传输速度也许更为重要（比如，车辆DTN【24】），尽管人们作出了一些努力，使Bundle协议更加的灵活（例如DTN重新传输模块【26】)，陆地DTN的路由/传输层问题仍然没有引起IRTF DTNRG的重视。

最近，【27】的作者回顾了IRTF DTNRG的一些努力和采取的途径。作者们指出了一些问题，例如命名、寻址、绑定、存储碎片、和DTN Buddle的错误检测、传输监护、拥塞管理以及DTN的安全问题。他们报告指出：由于缺乏灵活设计，基于深太空DTN环境的基础结构较难适用于陆地DTN环境。他们总结道【27】：尽管（科研人员）近来做出了一些努力，譬如采用较灵活的“责任实体”或者说监管人，后期绑定以及预先/交互式的碎片存储选项，但是仍然存在着一些问题值得我们深入调研。这些问题有路由，安全性，拥塞管理及控制。在我们看来，为了处理这些问题，我们理所当然选取的一些严格要求（面向深太空网络环境）必须要放松一些。比如，充分可靠性不再是先决条件。或者，与连接时间相关的系统性能可以放弃（absent：缺席）。

在【28】中，作者确认了一些问题，而这些问题有关于Bundle协议以及建在顶层的对应结构的相关描述。例如，他们认为规格说明中错误检测机制的缺失（例如，校验和）将导致监管传输功能的不可靠【28】。特别的，一条损坏的信息可能成功的到达目的地，但是节点只能意识到这个事实：数据转发到顶层运行的应用。大体上，论文指出了Bundle协议的一些有趣的概念，并且为未来的工作指出了方向。总而言之，我们与【28】的作者意见相同，Bundle协议描述更大程度上是一种复杂的文档格式描述，而不只是互联网协议描述。尽管DTNRG可以已经考虑到安装以及/或者专用设置并对此进行了研究，我们仍然这样认为：Bundle协议已经变得十分负载和顽固，以至于无法适应所有潜在DTN部署。



(目的：1.空间探索2.野生动物追踪（生物学方向）3.发展中国家联通4.车辆DTN道路通讯5.社交及分组移动网络)

4.2陆地DTN结构与协议类型

作为一个独立的研究领域，尽管DTN还是相对新颖的概念，不过已经出现了不少针对陆地DTN环境（例如，DakNet【30】，ZebraNet【29】，UMassDieseNet【31】，【34】）真实评估的路由实现。我们在下文列举出最为重要的几个网络（在表1中也可以看到）

4.2.1野生动物寻踪-斑马网络

在斑马网络项目【29】中，研究人员给肯尼亚的斑马群“配备了”增强传感颈圈，以便收集种群移动以及社交行为的信息。这个由生物学家和计算机科学家组成的研究小组充分地考虑到一些细节，例如路由协议的安装以及应用。他们的观察报告可以在【29】中查看。其中，作者检测了两种不同的路由协议，一个是以洪泛为基础的（在7.1中查看），这一协议我们稍后讨论。他们报道了有趣的权衡（tradeoffs），考虑到了能效，存储要求，以及传输成功。

4.2.2为发展中国家提供连通性

近来，（研究机构）进行了数目可观的研究，旨在为发展中国家提供连通性（connectivity）。代表性的，我们选择了DakNet项目【30】，该项目为印度以及柬埔寨的一些偏远山村提供了连通性。其主要思想如下：在偏远山区的电话亭配备计算机，为村民提供数字应用，国家性文件的需求（requests for national documents），银行服务，电子邮件等等。一旦村民的需求集中在一起，它们就会被传输到最近的城市，而那里存在着互联网连通性。通过机械回程的手段【34】（with means of mechanical backhauls），例如安装有无线设备的公共交通工具（如公交车）。显然，这个项目的关键点在于尽可能的降低安装与运行的成本。从这个方向来讲，【34】作者对于设置做了一番透彻的分析：使用机械回程的农村网络电话亭的低成本通讯。作为参考，作者考虑到了DTN结构，DTN结构首次提出于RFC 4838【12】，随后经过Fall的深入调查【14】变成了Bundle协议规格。作者们针对整个协议的设置进行了讨论（即命名，寻址，位置管理，路由，移动性，安全性以及应用支持），并得出结论（尽管没有模拟结果）：100%可靠的数据传输以及智能路由是很棘手的问题，极难处理。【34】中的结论与我们在【10】中的解决框架，以及在3.1部分中的设计说明一致。

4.2.3车辆通讯

近年来，基于【35】【36】【37】【38】【39】等早期研究的车辆通讯引起了（人们）的极大重视。该领域研究的最终目标是为上班族（commuters：通勤者）提供连接。然而，由于交通工具种类的不同，连接方式也有所区别。例如，一旦操作员发现有利益，通讯基础设施可以部署在火车上，除了连通性，还可以提供网络可靠保证时【40】。另一方面，无路由交通工具（例如公交车【31】【24】、私家车【41】【36】【32】和自行车【42】）不得不忍受长时间的延迟和间歇性的联通。因此，人们期待DTN技术可以同时应用于上述环境。

4.2.4分组交换以及移动社交网络

人们期望社交网站，例如Facebook【43】，LinkedIn【44】，Twitter【45】以及其他一些网站可以移动应用【46】【47】。也就是说，用户可以即时（即一跳式传输）交换共同爱好的信息（如好友更新，上传事件，新闻【48】【49】），而不需要互联网联通。特别的，我们期待在偶遇（encounter）条件下，移动设备可以互相问询对方，以更新共有内容，并相应的交换信息，而不需要通过连接互联网更新信息。以下是针对这些网络的一些挑战。例如，设备以怎样的频率交换信息？或者，一个设备每一次的相遇都要搜索信息吗？设备多长时间需要接入网络更新内容？在哪种情况下它需要更新？已经有很多的项目研究过上述的问题。例如，Haggie Project【50】，the Million People Project【51】，the SocialNets【52】和PeerSoN project。我们会在7.3部分中探讨这类通讯的路由含义。

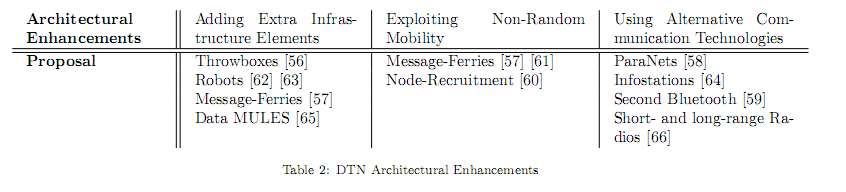
在Haggie Project【50】，【33】中，研究人员试图在DTN环境中建立一个以人为中心的方法。他们调查了分组交换网络以及Haggle应用中可靠性、数据传输延迟的权衡。他们收集潜在Haggle用户的倾向性，从而得出延迟和可靠性限制，并建立Haggle协议。协议同时也包括很多Haggle应用，旨在帮助建立路由和数据传播算法。在Haggle背景下，这些算法的设计是根据用户对服务的需求（或者应用的服务目标）以及系统的限制。这就

是说，我们认为Haggle方法是DTN研究中最让人感兴趣的方法之一，因为它考虑到了应用以及用户的倾向性。

4.3陆地DTN结构的强化

陆地DTN环境的有限连通性会被解释成有限的网络容量。如此，研究人员调查了各种方法通过提高联通机会以提高可用网络容量。调查人员分析了三种主要方法（表2）（1）增加额外的基础设施元素（【56】【57】）（2）开发可选的通讯技术传输数据（【58】【59】）（3）开发节点移动性

我们将在下面讨论每一种方法



4.3.1通过增加基础设施以提高容量

在一项早期研究中【65】，作者调查了DataMULES中能源，存储以及可靠性的权衡，结论是MULE节点绕着传感器网络移动以收集传感数据，并且触动对应节点的缓冲释放。作者通过一个技术上可靠的模型评估稀疏传感器网络系统的表现【65】。随后，他们通过模拟将所得到的分析结果分类。尽管作者做出了一些简化假设，例如MULEs之间不交换数据，只和（静态）传感器节点之间交换数据，然而他们的模型仍然可以通过扩展来适应不同的DTN环境。在其他之中，作者认为高可靠性（以数据成功传输率为衡量标准【65】，）是以高存储需求为代价的，这与3.1部分中位置陈述Position Statement意见相同。上述研究从相似的区域内传感器节点分布方法（【67】【68】）之中借鉴了一些思想。

【56】中的作者推荐throwbox的使用，目的是提高网络容量。Throwbox是一种装有电池的设备，有存储以及运算能力，一旦被部署在网络中的一些策略节点上，它便可以提升网络的容量，借此提升网络的吞吐量。【56】的作者主要致力于提高系统可靠性以及高能效【69】，而不是降低数据传输时延。针对同一方向，【70】作者建议连接分区的Ad-hoc网络以及区域扩展网络。特别的，每一个孤立的ad-hoc网络都可以通过CCAs(跨层通讯代理)把数据传输到互联网的其他部分，反之亦然。CCAs可能在飞机之中，低轨道卫星，过往车辆等等。基于价值函数，作者提出了CCAs的最佳轨迹，并且，考虑到传输延时，成功传输包的百分比，以及每个CCA的吞吐，作者评估了建议的结构。然而，作者没有详尽的考虑到上述系统属性的权衡表现。

在【62】【63】中，作者建议向系统中添加被称为‘机器人’的自治代理，目的是增加传输的机会。在一切可能的条件下，他们研究，影响系统参与者（DTN节点）的移动。尽管这种方法是提高能效还是降低能效仍然值得商榷，但是从传输延迟和可靠性角度上来讲，机器人的部署对于一些DTN环境还是很有用的。本质上，我们认为【56】【62】中的工作与【57】中的信息摆渡以及【60】中更早一些的想法有所不同。我们将在4.3.2中详细讨论这些研究。

4.3.2通过开发非随机节点移动以提高容量

有相当多的关于无线网络容量的研究，例如【71】【72】【73】。在【71】中，作者证明了“移动性可以提高ad-hoc网络的容量”。特别的，他们证明，在延迟限制不那么严格的前提下，网络容量，同时还有吞吐量上升明显。然而，吞吐量得提升(同时也意味着可靠性的提升)加剧了数据传输延迟（这点与位置1相统一）。以此为基础，【74】的作者研究了可携带电脑环境的数据传输机制。举例说明，配备有便携电脑的人在途经静态节点时，可以收集并携带信息，他们可以向设备提出要求（例如，在火车站中，要求将咖啡机重新装满）。【74】的作者为了丢包策略，超时重传，确认重传和路由算法调查了很多方法。他们同时也研究了可靠性与电池驱动设备能效两者的权衡【74】。

【57】中，作者建议部署一些成为“信息摆渡点”的特殊节点。这可开发了节点的非随机移动性，以便于收集信息，并将信息传递到目的地。它的目的在于降低能源消耗，并且提高可靠性（在原始论文【57】中被称为传输延迟表现）。参见第一部分，作者研究了信息延迟、信息传输率、缓冲区大小、单位时间传输信息之间令人感兴趣的权衡。在之后的工作【61】中，同样的作者试图控制多组数据传输渡点，以便将平均数据传输时延最小化。在【60】中，作者提出‘“循环”节点以便将数据从源头传至目的地。换句话说，作者提议调整节点的移动轨迹以适应信息路径/路由的需求。我们期望诸如【62】【57】【60】【61】中的方法具有有限的应用，因为本质上，节点/用户应该为通讯系统的需求服务，而不是反过来。

4.3.3使用可选通讯技术以提高容量

【58】中，作者提议利用一切可用的网络技术（卫星网，细胞网络等），以实现延迟容忍移动网络性能的优化。根据平行网络（或者说是平行网结构【58】），DTN应用可以在不同的传输层、网络层和连接层之间选择，以优化相应的性能。很明显，利用所有的方法传递数据，会使得平行网的规模扩大【71】。他们指出，一个应用在细胞网络内传送ACK包，而不是卫星网，具有高速释放存储空间的潜力。

在【66】中，作者（基于之前的研究的DTN能源管理【75】）提议使用两种广播：长距离，高功率的广播，以及短距离低功率的广播。短距离低功率广播用以覆盖一定范围内所有的节点。一旦发现有邻居节点，就激活长距离广播来传输/接收数据。作者将沉睡及唤醒时间间隔考虑其中，以分析能效（energy-effeciency）。除此之外，他们还研究了能量消耗和数据传输延迟之间的权衡。在相似的研究中【59】，作者建议在蓝牙设备中额外的附加蓝牙广播。【59】【66】中的结论大体上与我们在【10】中的结论相一致。

（研究人员）在Infostation【64】背景下调查了不同通讯技术之间的权衡，Infostation可以为用户/节点从/到目的地/源点传输数据。然而，容量-延迟的权衡使它的性能显得模糊，而且这点很难得到有效地处理，它依赖于具体问题中的应用。【76】中，作者针对共享Infostation无线模型（SWIM）扩展了Infostation范例，在SWIM中，数据可以自我复制，传播，以便更快的接触Infostation。然而，容量再次因为更多的数据/信息传递而妥协。【76】中的作者提供了针对延迟-容量-存储权衡的分析。【77】中，作者拓展了SWIM模型，并建议提出修改，通过提高灵活性以提高存储，通过限制传输以节约能源。【76】【77】中的结论与结果与我们在【10】中的看法，第三部分中的讨论结果相一致。

# 应用层

## 内容传输

文献[35]是解决DTN应用的可扩展性的一个初步尝试，在此文献中，作者提出了一些局部应用，例如合作道路拥塞监测，路由规划，快速追踪等，并且研究了当许多节点使用这些应用时的可扩展性问题。同样，文献[83]的作者实现并应用了一个分布式移动传感器计算系统。这个系统叫做CarTel并且在车载系统中得到应用。将来能够使用CarTel系统的应用包括环境监测，公民基础设施监测，车载诊断，地理成像和数据监测等。CarTel是一个基于队列的编程接口，它提供了一种简便的方法来设计DTN的应用。在车载交互系统（如[83]中的CarTel和[35]中的CarNet）中，对有限资源的消耗的需求在将来可能会减少，因为在不久的将来，移动设备可能有由车辆引擎提供动力的选择。但是，在这种情况下需要额外的设计。例如，“我们能不能有对有能源限制和没有能源限制的环境都适用的应用？”这样的问题需要进一步的研究。

电子邮件作为一个DTN应用应当得到足够多的重视[82],[89]。根据定义，电子邮件是一个容忍延迟的应用，因为邮件的发送者并不期望立即得到回复（例如，收件人可能在几小时或几天后才检查邮箱）。但在因特网中支持电子邮件应用的协议并不是为了延迟容忍网设计的（例如POP,IMAP,SMTP等运行于TCP协议之上的协议）。在文献[82]中，作者使用包协议，并且引入一些网络实体，例如延迟容忍网邮件网关，使在受挑战的环境中邮件获取和分配成为可能。也就是说，用户在成为网络局部的一部分的同时，既能向这一局部网络中的用户收发邮件，也能向网络中其他的部分收发邮件。我们主张在延迟容忍网邮件应用之前，可扩展性问题必须考虑到能源，存储空间，传输可靠性而需要广泛的研究，因为这个应用将会被广泛地使用。同样的考虑在文献[90]中也适用，在此文献中，作者为移动电话建立了DTN应用。这种思想的主要意思是使用无线网络技术从而使用户之间的直接交互成为可能，这种方式可能会忽略掉操作者的基础设施。

文献[80]的作者开发了一种延迟容忍的遥控应用，称作延迟容忍外壳(DTS)。具体来说，他们改变了远程遥控管理工具的基本功能以使它成为容忍延迟的；更进一步说，他们向其中加入了一个可靠且高效的出版-订购机制，称作状态同步(StateSync)。此系统能够保证只要结点互联，指令就会得到散播和执行，并且只执行一次。指令的成功执行会被反馈到发送站以确保遥控任务的成功完成。

## 内容检索

在文献[79]中，作者讨论了“移动网中应用协议设计的考虑”。作者讨论了和应用协议设计相关的几个问题，例如命名和地址，安全，中间媒介的作用，以及用户接口等等。在作者的讨论中，假定数据传输是建立在异步传输的基础上，这样假定的目的是为了处理移动和常断连接网络的独特特点。此文献的一个结论是DTN应用必须为了预知用户的需求而设计，而不是不断地产生新的需求。这就意味着，例如，DTN网络浏览器在网络搜索引擎进行一次搜索后讲不止一个结果下载至本地缓存；反过来，用户比仅仅下载第一个搜索结果有更大的可能得到所需信息。作者认为，通过这种方法，连接几率明显地得到更高效地利用。然而很显然，存在许多效率的权衡。事实上，下载不止一个搜索结果会：(i) 增加成功的可能性，(ii) 减少信息传递时间，但它也会增加：(i) 能源消耗，(ii) 存储空间需求，(iii) 网络资源的利用（例如带宽）。这些权衡因素不作讨论，尽管在我们看来，它们会影响系统的效率。

在一个相似的研究中，[81]，作者讨论了在受挑战，间歇连接和高度分割的网络中数据存储和检索的问题。具体的说，他们为应用层协议提出了一些修改，以便消息能够在DTN节点中存储，即使当消息在成功传递至目的节点后（例如，这将对大众车辆交通中普及的网页非常有用；将一条著名的新闻入口下载至一条繁忙的火车中就是一个例子）。一些缓冲和存储的问题在文献[81]中得到了讨论，仿真结果显示事实上缓存技术对效率的提高有很好的作用。文献[81]中的方向和结论与我们预先提出的设计上的考虑是相同的。但是我们认为，在缓存技术的广泛应用之前，深入的研究是必须的，因为尽管非常有用，它们也可能产生负面效果。例如，文献[81]并没有讨论可靠性问题。取而代之的是，为了丢弃旧的消息，存活时间（TTL）计时器得到应用。我们认为，对于某些应用来说，只有当交付能够得到保障时（如电子邮件），消息才能被丢弃，而这种功能是不能被盲目的，独立于应用的TTL计时器所实现。

在同一方向上，文献[24]的作者提出了“Thedu”，一种通过DTN提高网络搜索的技术。Thedu技术为搜索结果赋予优先级，将更可能有用的结果传输至用户页面，而不是用简单的搜索技术。更具体的说，Thedu，[24]，将队列划分为三种类型中的一种，分别叫做：主页，内容和服务队列。根据这种划分方法，它决定了传输至用户的搜索结果的数量。作者在DieselNet [31]中实现并测试了他们提出的算法，并且结果显示非常高效。他们在报告中提出由于这种分类技术，Thedu将系统效率提高了12%。这是因为，如果没有使用Thedu技术，无关网页返回给用户，浪费了宝贵的带宽资源。然而在文献[24]中有些问题没有得到解决。例如，Thedu比一次简单的网络搜索返回了更多的数据给用户。这种方法不可避免地增加了DTN系统所需的能源消耗和存储空间资源。不仅如此，作者假设每条队列都有一个具体的传输截至时间（例如一个超时计时器）。根据我么的设计角度，这意味着传输可靠性降低了，因为在截止时间后系统不会将数据传输给用户。但是在文献[24]中并没有讨论是否有重传的尝试。

# 运输层

我们分别在两个部分中讨论对传输层的提议：在6.1节中讨论的深层太空环境，或者行星间[91]的数据传输，和6.2节中讨论的陆地DTN（见表4）。我们选择这种结构的基本原理如下：在深层太空空间，即使连接存在，延迟也非常高。相反，在陆地DTN中，一旦连接存在，交互就想在英特网中一样，延迟是可控的。这就不可避免地会影响到相应的设计原理和规则。

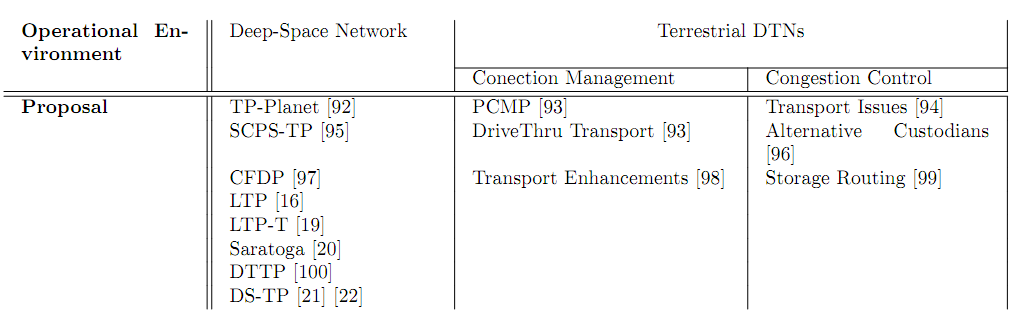


表 4 <受挑战环境中运输层的建议协议>

## 深层太空DTN中的建议

太空数据系统委员会（CCSDS）[101]设计了太空交互协议标准和传输协议（SCPS-TP）[95]。SCPS-TP协议继承了TCP协议的主要功能并且做出了一些延伸，以对应深层空间连接[102]中一些独有的特点。此协议以两种模式运作：(i) 基于TCP-Vegas[103]的范.雅可布松拥塞控制模式 (ii) 开放环路速率控制模式，此模式运用来自接收端的“腐败经验”信号并且传输假定链路中不存在拥塞。开放环路速率控制利用否定确认（NAKs），而不是在范.雅可布松模式中常见的ACKs。对SCPS-TP协议效果的实验评估可以在文献[104]中找到。

这个委员会也提出了一个面向文件的传输协议，CCSDS 文件传输协议（CFDP）[97]，此协议主要包含了运输层的功能。文件传输可以以可靠的（确认模式）或者不可靠的（无确认模式）的方式执行。CFDP包含四种模式来发送否定确认（ 如延迟的，立即的，被激发的，异步的），同时也是用ACK确认，以保证重要协议数据单元的成功接收。

文献[16],[17]的作者设计了一种端到端的文件传输协议，此协议可以作为DTN的一个聚合层。里克里德传输协议（LTP）[16]将每个数据包分为两部分：红色部分必须可靠地传输至目的地，绿色部分允许传输错误（不可靠传输）。作为LTP协议的延伸，LTP-T[19]协议用来处理多跳数据传输。在数据传输是无误的情况下，LTP-T协议和LTP协议是等同的，因为LTP-T协议将端到端的多跳连接划分为一跳一跳的连接，以防止传输错误。在文献[105]中，作者比较了LTP协议和LTP-T协议的效率。他们发现，数据包中红色部分越多，端对端的延迟越高。

萨拉托加是由萨里卫星技术公司开发的可靠的，基于速率的UDP/IP文件传输协议[106]。萨拉托加协议能够在专用的端对端连接中传输大量的图像数据。它以线性速率（事先设定且已知的）传输数据并且假定链路层的编码技术处理链路错误。萨拉托加协议也使用否定确认以保证完全的可靠性。它可作为会聚层交换DTN数据包[20]。

在文献[100]中，作者设计了DTTP协议，一种容忍延迟的传输协议，以提高可靠性和效率（就资源利用而言）。显然，此协议目标是深层太空数据交互，并且既能应用于含有IP的协议栈，也能应用于没有IP的协议栈。DTTP协议能够提供可靠和不可靠的交互。作者讨论了可靠性和端到端延时之间的权衡。也就是说，高可靠性就必须要求更广泛的传输，这显然增加了总体传输时间。

在文献[21],[22]中，作者提出了DS-TP，深层空间传输协议。DS-TP协议想深层空间连接中插入多余的数据包以预先处理增加的错误率。它提供了利用包包连接模式的可靠交互。DS-TP协议引入的多余数据既影响了DTN中间节点的存储空间需求，也应先管理数据端到端的延时。和萨拉托加[20]以及LTP[16]这些假定链路层有很强大的编码能力的协议不同，DS-TP[21]运用冗余数据包的传输来处理传输错误。DS-TP中包含的技术以被验证能够显著提高运输层协议的性能。需要更深层次的研究，以决定链路层编码和传输层冗余哪种方式更好，或者是这两种方式的结合。

## 陆地DTN的建议

传统意义上，传输层协议必须解决两个基本问题：(i) 连接状态的维护以及(ii) 拥塞控制。在延迟容忍网络中这两个问题必须重新考虑。连接中断通常会使传输层协议丢弃连接，拥塞控制原则主要应用于网络中间实体（如路由器）。相反，在DTN中，连接可能需要保持，不管有没有连接的中断，网络中间路由器的拥塞控制需要转变为DTN结点的存储拥塞控制，因为结点可能超过存储空间（不仅仅是缓存空间）。我们在以下内容中讨论运输层的这两个问题。

### 连接状态

和短延迟，连接不会中断的因特网相比，在有中断倾向的环境中，连接的建立与释放是有重要意义的。在这个方向上，有很多对于传输层协议中断容忍机制的研究。在文献[93]中，作者引入了PCMP，稳固连接管理协议，其主要功能是在无中断DTN环境中保持TCP连接。他们的方法和“分开连接”传输层协议相似，如Snoop-TCP协议[107]，此协议为无线网络中的TCP协议提出。

考虑到无中断环境中相连岛屿之间的数据传输，文献[93]的作者讨论了需要解决的重要问题。例如，一辆进入道路无线网的汽车连接分为三个阶段：(i) 进入阶段 (ii) 生产阶段 (iii) 退出阶段。如果在生产阶段数据传输没有完成，连接状态必须保持，直到汽车到达下一个连接的岛屿。在相同的研究中，[93]，作者也在真正的道路场景中进行了实验验证，并且发现，事实上即使汽车速度很快，大量的数据也能够得到传输。

在一个相似的研究中，[98]，作者将以前提出的技术，称作TCP用户超时选择[108]和TCP重发触发器[109]与主机一直协议连接起来。增强后的协议能够：(i) 通过应用TCP用户超时选择[108]避免由于中断导致的连接丢弃；(ii) 通过更加高效的重传超时设定利用更高效的连接时段（通过应用TCP重传触发器[109]，相似的考虑到TCP-RTO的结果和设计可以再文献[111]中找到）；(iii) 通过应用HIP[110]避免由于IP地址变化导致的连接丢弃。

尽管上述这些研究为无中断因特网（或者宏观上的移动网络）开了一个好头，依然存在许多问题需要更深入的验证。例如，在文献[93]中，高速公路上汽车的下一个连接的岛屿被假定为预先知道的。但这并不适用于真实，广泛应用的场景（例如，汽车通常任意行驶）。不仅如此，数据量，接入点密度，网络争用（例如，在同一个连接岛屿上目前有多少数据流）这些问题也需要得到解决。从这个角度来说，传输层协议的性能需要更广泛的研究：可用空间必须得到快速分配，以最大可能利用连接时段；DTN中的带宽分配必须得到重新考虑；噪声信道更大程度地降低TCP的性能，其必须和能源消耗等问题一起得到更深入的研究，后者在以上的研究中都没有得到考虑。最后但同样重要的是，可能触发存储空间重新分配（例如为避免存储拥塞）的确认机制，必须和可靠性问题（例如，丢弃一个还未传递至目的地的消息可能会降低系统的可靠性）一起得到研究。研究团体必须考虑替代传输层模式（如[112],[113],[114],[115]）以在受到挑战环境中更高效的传输数据。在这样的环境中实现传统的TCP或类TCP协议可能会导致性能的降低。

### 存储拥塞控制

DTN环境中的存储拥塞控制受到传输层协议的确认策略的很大影响。一旦数据得到确认，相应的消息就可以丢弃，存储空间就变为可用。在文献[94]中主要对DTN环境中确认策略进行了研究。作者主要研究了不同策略的传输效率和消息在确认和丢弃之前所需的时间。他们使用一下场景：一条消息从源节点S发出，经过一定的中间节点F，最终送达目的节点U。作者主要考虑了四种不同的确认策略并且研究了和端对端延迟有关的端对端可靠性问题。具体来说，四种确认机制分别为：

#### 单跳制，每个中间节点F收到监护传输，立即将ACK返回给发送此消息的结点，

#### 主动接受，当目的节点U收到消息后发送ACK，ACK沿传递消息的原路返回，并改变中间结点的状态，

#### 被动接受，只有当一个结点试图重新发送同一个消息时，目的节点发送一条杀死消息，返回至源节点S，

#### 网桥接受，在此策略中，替代技术，例如移动网络技术用来确认消息的接受。

基于以上策略，作者研究了传输可靠性，排队时间，传输率之间的权衡。文献[94]中的结论与我们在文献[10]中介绍的设计原则是一致的。例如，尽管主动接受能够保证100%的端对端传输可靠性，它增加了排队时间从而增加了总体的传输延时（第一种情况）。不仅如此，单跳制策略减少了存储需求和端对端传输延时，但它不能保证端对端的传输可靠性（第二种情况）。显然，网桥接受机制既减少了存储需求也减少了传输延时，但它不能替代传输方法（如移动网络）在DTN中总是可行的。

文献[96]和[99]的作者研究了存储路由方法以减少DTN中的存储拥塞。其基本思想是当一个结点存储拥塞时，它向替代监管节点发送它的一部分消息以缓解拥塞，从而适应将来的网络。此算法包括两部分：消息选择和结点选择。作者根据消息完成率，存储空间和加权时间存储提出了推和拉的操作。文献[96]中讨论的权衡问题与我们的设计框架是一致的。例如，作者总结，高消息完成率（既传输可靠性）要求大的存储空间。但我们认为，虽然从技术层面上来说，[96]和[99]中的分析和结果是可靠的，但能源问题并没有得到考虑。也就是说，释放节点的存储空间以满足将来网络需要可以增加传输可靠性，但它也会增加能源消耗。反过来，更多的能源消耗会导致结点无法继续运行；从长远意义上讲，这会导致存储资源的降低，系统性能，总而降低了可靠性的保证。不仅如此，消息的传输可能会增加传输时延，因为数据并不是向最终目的节点传输，而是在相邻节点间传递。显然这些问题需要更深入的研究。在文献[116],[117],[118]中同样研究了缓存管理和丢弃策略。

# 路由-转发-数据传输

显然，延迟容忍网中的路由问题是最重要也是最吸引研究团体的问题。和传统路由协议必须找出到目的节点的最短路径相反，DTN路由在作出决定之前必须要考虑到更多的问题。尤其是，在传统的无线网络[4],[19]中，在传输进行之前，已假定存在端对端的链路。相反，在DTN中，这种规则并不适用。因此，DTN路由协议必须通过适用“存储-携带-传输”技术将消息传输至目的节点。DTN转发主要有三种方法：(i) 洪泛/传染病或称作基于复制的，(ii) 概率的或叫做基于历史的，(iii) 基于认知的。DTN转发协议的主要问题是转发算法向网络中发送消息副本的数量。在这里，我们以对一些为DTN路由提供深刻见解的研究为开始，然后分别讨论上述三种不同的机制。一些更久的相似分类可以在文献[9]中找到。

在文献[120]中，作者提供了受挑战网络中的路由体系。作者根据连接的级别将受挑战的动态网络分为三种类型。具体来说，他们引入了最终可连网络（ECDN），最终可路由网络（ERDN）和最终可传输网络。每种路由机制都根据一些属性进行评估，例如是否需要端对端路径，是否只复制一次，是否不可计划（知道）[120]。作者试图对每种路由机制的可解性进行评估。他们得到了重要的结论但没有把传输延时考虑在内。也就是说，如果一个动态网络是可解的，给定属性，不管传输延时，消息都被传输至目的节点。在一个最近的研究中，[121]，作者使用图论试图将传输延时包含在[120]中提出的DTN路由问题。但他们放松了是否不可计划的属性。他们假定连接是可预测的。文献[122]展示了一种更加全面的使用图论的路由框架。

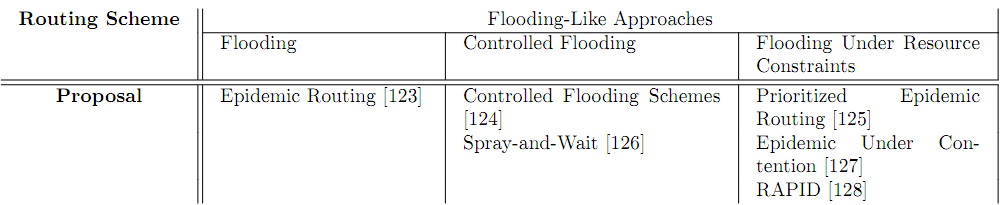


表 5 <DTN洪泛式路由方法>

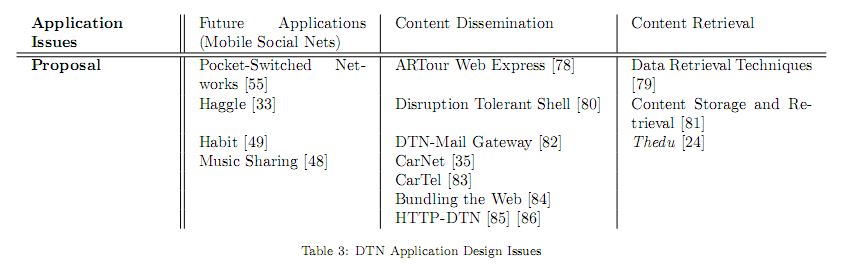
【后面木有了。。】

# 部分重复的翻译

为延迟/中断容忍网络设计应用层路由协议也许是所有任务中最具挑战性的。因为，网络结构自身和支持的网络层、传输层协议需要和系统组件进行交互操作，它们被设置，维修，并且可见（或者说可以在节点之间通讯），应用必须要处理任意参数，还有用户的偏好。用户的偏好包括用户的思考时间，收到回应前的耐心，打字和上网习惯。当然，需求指的是处理坐在电脑显示器前的用户（或者是移动设备前的用户，总的来说）需求的应用。

在Haggle项目【50】中，研究人员针对新的应用采取了一项有趣的新方法，研究人员构建了新的结构，以激活分组交换网络【54】。在这种环境下，用户可以充分利用局域和全球连通性。更精确的说，该想法主要是将节点中心范例转换成数据中心范例。在这种情况下，一些新的应用可以投入使用，同时已经存在的应用性能会得到提高。

我们注意到这一部分所包含的讨论仅仅是针对DTN环境潜在部署的初步尝试。正如我们之前提到的，DTN环境下的杀手应用（killer application）有待发现【8】。接下来，我们将讨论当前一些关于DTN部署与安装的重要研究成果。该方向的研究主要关注如何进行变化、修改，使现有的互联网应用及支持性的协议可以容忍延迟或者中断。特别的，作者们关注于：（1）内容传递和（2）内容检索（表3）



5.1内容传播

在【84】中，作者建议“绑定网（Bundling the Web）”：目前，为了下载网页的内容，主机打开了很多的通话（即TCP连接），每一个对话为内容的某一个部分（文本或数字）负责。在【84】中，作者建议网页的内容可以包含于一个单独的束（bundle）中(例如【87】中使用MHTML),这样可以避免“chatty（健谈的，饶舌的）”处理。尽管这种结构看起来前景光明，相关的性能权衡却没有处理。例如，作者的耐心以及思考时间是怎样影响结构设计以及相应协议的设计的。

在【85】中，作者建议HTTP（超文本传输协议）-DTN，这是HTTP/1.1的新版本，可以适应挑战环境下的需求。特别的，作者提议，一旦两节点连接，那么HTTP（超文本传输协议）就可以像点对点协议一样工作（在适当的汇聚层上运行【88】），并且允许多个文件的双向传输。这样，所有的节点（源点，目的点，或者是中继点）可以尽可能的利用连接间隔。在【88】中，同样的作者列举了不同传输协议下合适的聚合层，而在【86】中，他们试图分离把HTTP从TCP中分离出来，从而通过其他更适宜的传输方式应用HTTP（依赖于环境）。其目的是使HTTP处于DTN协议栈的中部，类似于IP处在TCP/IP协议栈中的位置。

早期工作中，【78】，作者引入了拦截者（即代理）以便使HTTP适应中断连接环境。特别的，我们使用两个代理：用户端拦截和服务器端拦截。这种被称为“ARtour万维网快车”的服务让异步要求/响应操作模式以及断连操作变得可能。主要思想是如果连接不存在，就对命令进行缓冲，并且在连接建立后处理命令。这样的应用可以在移动环境中部署，如交通工具。然而我们还不得不根据想要的传输可靠性考虑规模问题，例如网页浏览，这一点吸引了很多上班族的注意。

在【35】中，研究人员针对DTN应用的规模问题采取了初步措施，作者们建议使用一些本地化的应用，例如协作道路阻塞情况监视，路由计划，河流（船队）跟踪等，同时在有数千节点应用时研究该应用的规模。同理，【83】中的作者安装、设置了一套分布式移动传感器计算系统（Distributed Mobile Sensor Computing System）。该系统被称为CarTel,它被部署在车辆上。CarTel可以提供的潜在应用有环境监控、内部基础设施监控、车辆诊断、地理图像和数据传递。