

DTN 体系结构及关键技术研究综述

黄星河¹ 李艾静^{1,2} 王 海¹

(中国人民解放军陆军工程大学通信工程学院 南京 210007)¹
(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)²

摘 要 中断/延迟容忍网络(Disruption/ Delay Tolerant Network,DTN)是从 Ad-hoc 网络中抽象出来的一种全新的网络模型。与传统的无线移动自组织网络不同,该网络模型的应用场景具有高延迟、易中断等特点。高延迟、易中断的网络环境被称为受限网络。DTN 作为一个针对受限网络的新兴研究领域,使用特殊的“存储-携带-转发”模式进行数据传递,以对抗受限网络中的高延迟和易中断带来的影响。它的发展将对未来军事战争、航天通信、抢险救灾等诸多场景提供更为可靠的通信保证。文中分析了 DTN 体系架构及其特性,研究了 DTN 路由协议并指出其适用的场景,最后总结了 DTN 研究中遇到的难点问题,并指出未来研究需要关注的方向。

关键词 延迟/中断容忍网络,体系结构,路由算法

中图法分类号 TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.12.003

Survey of DTN Architecture and Key Technologies

HUANG Xing-he¹ LI Ai-jing^{1,2} WANG Hai¹

(College of Communications Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)¹
(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)²

Abstract Disruption / Delay tolerant network (DTN) is a totally new network model abstracted from MANET(Mobile Ad-hoc network). Different from traditional wireless mobile Ad-hoc networks,DTN is mainly used in high-delay and in-stable environment. As an emerging study area for restricted network environment,DTN uses a special mode “store-car-ry-forward” for data transfer,so as to combat the effects of higher latency and disruption in restricted networks. The development of DTN will provide a more reliable communication for scenarios such as future military wars,space com-munications,disaster relief and so on. In this paper,firstly,the architecture and characteristics of DTN were analyzed. Then the DTN routing protocol was studied from the aspects of the calculated amount, reliability and dependence on other node’s state information. Finally,some difficult problems on DTN were presented,and some research topics that might bring great progress to DTN systems were emphasized.

Keywords Delay/Disruption tolerant network, Architecture, Routing algorithm

1 引言

无线移动通信因具备便携性和接入成本低等特点,已经成为现代通信业务中不可或缺的组成部分。移动无线通信与传统的有线通信存在很大的区别,例如节点经常移动、网络拓扑动态改变、节点之间频谱的相互干扰等,这些特点都给移动无线通信的研究带来了巨大的挑战。

传统的以 MANET(Mobile Ad-hoc NETworks)为代表的移动无线通信体系架构是使用一组带有无线收发装置的移动终端组成的一个多跳临时性自治系统,移动终端具有路由功能,可以通过无线终端构成任意的网络拓扑。MANET 基

于 TCP/IP 协议,数据可靠传输的前提是网络能够提供较高的实时性保障,因此 MANET 协议在高延迟和缺乏持续可靠连接的网络环境中的效率很低,甚至无法正常工作。例如,在星际通信、无人机自组网通信、战场以及灾区通信等场景中通信时,基础设施缺乏、通信节点稀疏、通信功率受限、节点移动范围大、节点移动速度快等特点将导致节点之间的连接频繁断开,网络拓扑频繁改变,并且节点之间可能长时间无法建立连接^[1]。

传统的互联网通信协议受到这些因素的影响,导致网络性能下降甚至无法正常工作。人们希望寻找一种可以在恶劣环境下进行有效通信的手段。DTN(Disruption/ Delay To-

到稿日期:2018-03-25 返修日期:2018-07-18 本文受国家自然科学基金:基于 Wi-Fi 性能保证的 LTE 与 Wi-Fi 共存机制研究(61702545)资助。

黄星河(1993—),男,硕士生,主要研究方向为延迟容忍网络,E-mail:xidianxinghe@163.com;李艾静(1986—),女,博士,讲师,主要研究方向为无线网络、认知网络,E-mail:lishan_wh@126.com;王 海(1972—),男,博士,教授,主要研究方向为网络编码、Ad hoc 网络、无线路由,E-mail:hai_wang@189.cn(通信作者)。

lerant Network)最初只是为了适应星际间长时延通信而在传统的协议中进行改造,后来研究人员发现其在地面上具有更为广阔的应用前景,希望将它发展为解决受限网络的一种通用方法。目前 DTN 主要应用于高延迟和缺乏持续连接的网络环境中,是一种面向不可靠网络的体系架构,其设计受到了传统的 Internet、电子邮件递送服务以及邮政系统业务分类思想的影响。DTN 虽然源于传统网络体系架构,但是由于其使用了特殊的传输方式,因此有着与传统的以 MANET 为代表的移动无线通信网络体系架构完全不同的一系列配套服务。

随着研究的不断深入,DTN 已经形成了一套较为完善的体系结构,其使用的“存储-携带-转发(store-carry-forward)”^[2]模式有效地解决了在受限网络中的通信问题,在军事通信、深空通信、抢险救灾、野生动物跟踪监测、偏远地区通信等端到端连接不稳定的场景中得到了广泛的应用,并且形成了一系列比较成熟的路由算法。本文通过大量的文献分析,结合 DTN 的研究现状,着重对 DTN 的体系结构以及 DTN 的路由算法进行研究。

2 DTN 体系结构

DTN 是中断或延迟容忍网络的简称,可以工作在传统基于 TCP/IP 的网络体系架构无法正常工作的网络环境中,在这些环境中,节点的端到端的稳定路径很难建立,网络中的数据传播具有很大的延迟。与传统的 MANET 不同,在 DTN 中,由于节点之间不一定存在稳定的连接,只有当节点位于下一跳节点的通信范围内才可能发生数据传输,因此当有数据到达节点或节点有数据要发送时,数据会被首先存放到该节点的缓存中,并被一直携带,直至遇到合适的下一跳节点才转发,这种数据传输模式被称为“存储-携带-转发”模式。为了能够实现这种特殊的传输模式,并且与传统的网络保持一定的兼容,DTN 设计者选择在传统 Internet 5 层协议栈中添加 Bundle 层协议栈,称为束层。该协议栈位于传输层之上、应用层之下,满足数据传输和缓存的需求。该层的主要功能包括以下 6 点^[3]。

- 1) 保管传递:节点具有保存数据和给其他 DTN 节点传递数据的功能。
- 2) 接收回复:目的节点收到数据之后,给源节点发送确认信息。
- 3) 保管传递通知:中间节点收到上一跳节点发送过来的数据之后,给上一跳节点发送确认通知。
- 4) 束转发和通知:当需要转发数据时,给下一跳节点发送确认消息。
- 5) 传递优先级分类:DTN 根据数据的紧急程度提供不同的传递优先级。
- 6) 认证:验证发送者身份和数据完整性。

通过添加束层,通信节点有效地克服了网络连接频繁中断和高延迟带来的影响。另外,束层还可以细分为束层和汇聚层^[4],其中细分之后的束层的数据块由 3 部分组成。

如图 1 所示,Bundle Header 中包含了发送数据的一些基本信息,例如目的节点 ID、创建时间戳、生存时间、字典长度等;Control Information 中包含了数据块控制标志位信息,该信息描述了如何处理、储存、丢弃数据;Application Data

Units 中包含了有效载荷等数据。

Bundle Header	Control Information	Application Data Units
---------------	---------------------	------------------------

图 1 束层的数据结构
Fig. 1 Data structure of bundle

通过这样的设计,DTN 可以最大限度地减少报文交互的次数,在受限网络中能够获得较好的通信效果。Bundle 协议代理可以将整个数据包分解成片段,就像 IP 协议可以将整个数据包分解成片段一样。如果目的节点收到的是数据包碎片,则目的地的 Bundle 协议代理重新将它们组合。

束层的业务实现离不开汇聚层的服务支持,目前汇聚层的协议主要有 LTP(Licklider Transmission Protocol)和 Saratoga。LTP 与 Saratoga 协议都基于 ARQ(Automatic Repeat-erQuest)传输机制,其核心的原理都源于 CCSDS 的文件传输协议^[5]。两者虽然都工作在 UDP 之上,但是在具体实现上各有不同。

LTP^[6]作为一种比较成熟的汇聚层协议,能够针对文件的特点选择合适的传输方式,例如一些重要的数据必须进行可靠传输,另外一些非重要的数据则支持不可靠传输;同时,为了适应受限网络高延迟的特点,LTP 支持无协商的数据传送;另外,当链路发生中断时,LTP 会停止通信进程,当链路重新连接时再恢复通信进程。但是,LTP 没有提供文件校验和错误检测机制,因此在可靠性方面仍存在一些不足。有些研究者针对 LTP 的不足提出了一些后续的改进版本 LTP 协议^[7-9],这些协议使用异步重传等策略来增强其传输可靠性。

Saratoga 是另一种使用得较为广泛的汇聚层协议,与 LTP 协议一样工作在 UDP 之上^[10]。Saratoga 协议采用选择性否定自动重传机制,以检测传输错误,提供可靠传输,常被用于解决当通信双方链路状态非常不对称时可能存在的问题。该协议支持单向传输,在长延迟中断的网络环境中可以通过选择文件偏移量描述符来有效地传输各类大小的文件;并且可以通过标志信息来发布其容量和需求,产生和返回描述性的数据包,数据包的内容包括拒绝或接受等信息,以进行选择性地重传。

传统网络中 TCP 协议已经发展得相当成熟,因此有人尝试对 TCP 协议进行修改以满足 DTN 的业务需求。TCPCL 协议(TCP Convergence-Layer Protocol)^[11]利用 TCP 协议为 DTN 节点提供可靠的通信保障,可以根据链路变化动态调整连接状态,并且可以根据端到端应用协同确定重传点,但是其性能受到文件句柄和硬件性能的限制。如图 2 所示,当有数据需要发送时,源节点的 Bundle 协议代理创建 Bundle 数据包,并将该数据包存储在缓存中。

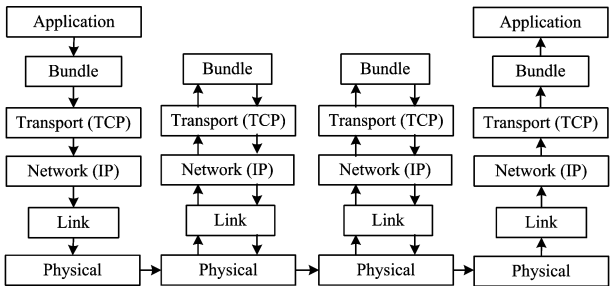


图 2 完整的 DTN 数据传输流程

Fig. 2 Process of DTN data transmission

源节点查询其路由表发现下一跳节点可用时,将 Bundle 中的数据包托管转让到其他节点,同时启动一个确认时间的重传定时器。如果下一个 Bundle 协议代理接受保管,它将向发送方返回确认。如果在发件人的时间确认到期之前没有返回确认,则发送方重发该数据包。上一个节点必须储存数据包直到另一个节点接受保管,或数据包的生存期限到期。

Bundle 协议代理可以使用可靠的底层传输协议,逐跳地向目的节点传输,重传点在中间节点中选择,这有利于在长时间延迟或连接不稳定的网络上进行数据传输。

3 DTN 路由的研究现状

传统 MANET 网络中假定链路有一条或者多条,通过设计路由选择算法从中挑选出合适的路由路径作为端到端路径。与 MANET 网络不同,DTN 的端到端的报文传输方式依赖于中间节点的“存储-携带-转发”,传统的 MANET 路由算法已经不再适用于 DTN,因此需要根据其特有的传输方式设计新的路由算法。针对 DTN 的路由研究自 DTN 诞生之日起就一直未曾中断,并出现了一系列有代表性的路由算法。根据原理的不同,我们将这些已有路由算法分为了基于未知网络状态的路由选择算法、基于已知网络状态的路由选择算法以及主动路由算法。

3.1 基于未知网络状态的路由选择算法

这类路由算法不需要预先知道网络的状态信息,它们将数据副本存放到缓存中,直至遇到不含相同数据副本的对等节点,将数据传递给下一跳对等节点,下一跳节点将数据按照同样的方法传递下去,直至将数据传递到目的节点。以下列举了一些较有代表性的算法。

1)Epidemic 路由选择算法^[12]

Vahdat 提出的 Epidemic 路由选择算法是一种典型的基于洪泛的路由算法,源节点产生的每一个数据都有一个唯一的 ID 编号,节点与节点相遇之后交换它们各自所携带数据的 ID 列表。含有数据的节点将数据发送给另一个不含相同数据的对等节点之前,首先会向该对等节点发送请求,不含数据的对等节点进行逻辑运算之后将反馈信息发回含有数据的对等节点作为数据请求,含有数据的节点收到数据请求后发送数据包给该对等节点。这种路由算法相对简单,计算量小,不依赖其他节点的状态信息,容易实现,数据到达目的节点的概率也是所有路由算法中最高的;但其也存在许多问题,例如会产生大量冗余数据,占用网络带宽,从而消耗节点存储空间,造成网络资源浪费等。针对这些问题,许多研究者提出了对应的解决措施,广播 ACK^[13]就是其中一种典型代表,这种方法在 Epidemic 路由选择算法的基础上将成功传递的消息广播到所有其他节点,以消除不必要的消息副本,从而避免浪费网络带宽和存储资源。

2)FC(First Contact)路由选择算法^[14]

在 FC 路由选择算法中,节点将其携带的数据传递给其所遇到的第一个节点,经过多次传递之后数据最终被传送到目的地。相较于 Epidemic 路由算法,FC 路由选择算法虽然有效控制了过量的冗余数据,但是由于其完全依靠节点的随机移动来传递数据,传递并不可靠。这种路由算法的极端情况是 Direct Delivery 路由算法^[15],在这种算法中,源节点只有

在遇到目的节点时才会进行数据传递。由于传递效率的不可控性,在仿真中以数据包的时延和到达率作为评判依据时,这两种协议与其他协议相比性能较差,但是当仅考虑平均跳数和网络资源占用情况时却好于其他的协议^[16]。

3)Spray and Wait 路由选择算法^[17]

Spray and Wait 路由选择算法是对 FC 算法的改进,其中含有数据的源节点可以将数据传递给非目标节点的中间节点,但中间节点不能将数据再次传递给其他的中间节点。Spray and Wait 算法通过这种方式来达到控制网络中冗余数据数量的目的,与 FC 算法相比缩短了平均数据传送延迟,减少了平均数据传递次数,但也增加了冗余数据的数量。

4)Spray Routing 路由算法^[18]

Spray Routing 路由算法通过控制发送报文的副本数量来控制网络中冗余数据的数量,这种控制是由源节点进行的。文献[18]提出了两种方案,第一种是数据源一次产生数个数据包的副本,当其遇到不含有相同副本的其他节点时就将其副本传递给该节点,并将其自身副本数量减少 1/2,同时下一跳节点的副本数也与上一跳的副本数保持一致,即也为上一跳原副本数的 1/2。一直这样传递下去,直至副本数变为 1,然后等待其送达目的节点。这种方法可以控制网络中副本的数量,避免产生过量的冗余。第二种方案与第一种分发数据副本的方法一样,唯一不同的是,分发之后,即使节点副本数量降为 1,中间节点也能向其他中间节点发送副本,条件是下一跳的节点具有比自身到达目的节点更高的概率,文献[18]已给出概率的计算公式。与第一种方法相比,第二种方法会产生更多的传输跳数并占用更多的带宽,但是比第一种方法的速度更快。另有一些研究者尝试对这类算法进行优化,Spray and Wait 路由改进算法^[19]是其中的典型代表,该算法通过节点移动的区域和该节点连接其他节点的数量计算需要生成副本的数量,以此达到优化网络资源占用的目的。

总体来说,基于未知网络状态的路由算法的基本原理都是洪泛,这类路由选择算法的目的都是通过控制网络中冗余数据的数量来降低网络负载和节点的存储压力,同时减小传输延迟和数据传递的平均跳数。其优点是计算量小、操作简单、容易实现,但是其缺点也很明显,即数据传递完全随机,没有目的性,效率相对较低。这类算法适用于节点十分稀疏、移动完全随机、交互信息量较少的网络。

3.2 基于已知网络状态的路由选择算法

基于已知网络状态的路由算法通常都会根据已知的部分网络状态,例如节点与目的节点相遇的概率、节点的计算存储能力等,来进行路由选择,这样能够更有目的性地转发数据,也是目前 DTN 路由研究的重要组成部分。其中比较有代表性的算法主要有以下几类。

1)Prophet 路由选择算法^[20]

Prophet 路由选择算法与 Spray Routing 算法的第二种方法类似,但节点会记录与其相遇过的节点信息,并将这些信息作为计算再次与这个节点相遇的概率的依据。当携带有数据的节点与未携带数据的节点相遇时,携带有数据的节点会计算未携带信息的节点是否有比自己更高的概率遇到目的节点,如果有更高的概率,则将数据副本传递给该节点。类似的基于节点之间关系的路由选择算法还有文献[21-24]中的算

法等,这些路由选择算法通过收集节点与节点之间的关系来计算下一次该节点与目的节点相遇的概率,从而判断是否将该节点作为下一跳节点,将数据副本传递给该节点。

2)RCM(Routing in Cyclic Mobispace)路由选择算法^[26]

研究人员通过收集节点的运动轨迹发现,在有人参与的社会性活动中,节点会以一定的规律在一个周期的时间之后重新回到相同的位置。基于此,RCM 协议通过收集节点运动的轨迹信息,来计算该节点与目的节点相遇的概率,并将比较结果作为是否将该节点设为下一跳节点的依据。类似的算法还有 Qi 等提出的通过“轨迹数据挖掘算法”来预测节点未来的轨迹^[27]等。这些路由协议的共同特点都是通过轨迹分析预测节点下一步的运动趋势,从而计算出未携带信息的节点与目标节点相遇的概率,决定是否将其作为下一跳把数据副本传递给该节点。与之前提到的通过收集节点与节点之间的关系来计算节点与目的节点相遇的概率不同,这些路由算法加入了节点运动的规律,目的节点的寻找更具目的性,传递效率相对较高,但不可否认的是这需要大量的节点状态信息交互,计算量较大。

3)R-ASW(Spray and wait routing based on relay-probability)路由选择算法^[28]

R-ASW 算法将节点的性能作为选择下一跳节点和传递副本数量的依据,这些性能包括节点的计算能力、存储能力、移动能力等,节点能力越强意味着该节点将数据传递给目的节点的概率越大。这种方法的优势在于交互的信息较少,计算量较小,并且能够较为有效地控制冗余信息的数量。类似的路由算法还有 Wang 等提出的基于节点能力的概率路由算法 PROPHET-TC^[29],Huang 等提出的考虑卫星存储资源的基于服务概率的有限复制算法 MPWLC^[30],Cong 等提出的将卫星带宽、链路建立延迟和节点空闲存储空间等作为路由转发依据的多属性决策路由算法 MADM^[31],He 等提出的考虑中继节点能量和缓冲能力的基于历史碰撞时间间隔的资源高效路由算法 RRPHETI^[32]等。

与基于未知网络状态的路由算法不同,基于已知网络状态的路由算法的数据传递过程往往更具目的性,并且效率高,产生的冗余数据较少,但是需要更多的节点状态信息交互,增加了节点的计算开销。这些算法适用于在节点计算能力较强、节点相对密集的网络中进行大文件的传输。

3.3 主动路由算法

另外还有一些主动寻找目标节点的路由算法,这些算法通常是基于任务的,需要提前设定好运动路线并主动去寻找目的节点。

MF(Message Ferrying)路由选择算法^[33]是主动路由算法中的典型代表。该算法通过制定数个移动节点沿着某条线路频繁地往返在节点之间来达到传送数据的目的,节点移动的路径选择直接决定了链路的吞吐量和稳定性。

文献^[34]设置了两种方案,一种是其他节点主动去寻找 MF 节点的方法 NIMF(Node Initiated Message Ferrying),在这种方法中,MF 节点按照自己的轨迹移动,其他节点主动寻找 MF 节点进行通信;另一种方案是 MF 节点去主动寻找其他节点建立通信。另外,随着研究的深入,研究人员又在文献^[35]中扩展了多个 MF 节点以增强鲁棒性;另外还有一些研

究人员将网络中的节点进行了分簇,簇与簇之间没有建立直接连接,通信需要借助 MF 节点的移动来完成。Zhang 等将主动路由算法与节点的历史信息和节点状态相结合,大大提高了网络的性能^[36]。

在通信资源受限的网络环境中,利用最小的资源快速、可靠地将数据送达目的地是所有 DTN 路由算法的共同设计目标。基于未知网络状态的路由算法虽然设计简单、容易实现,但是在整个过程中因为数据传递是完全随机的,所以传递往往不具有目的性,并且传递的结果具有不可控性,相对于其他路由算法效率较低。而在未来网络中,如何合理利用网络资源也是网络路由算法设计中不得不面对的挑战,因此未来 DTN 路由算法的研究方向应该更加倾向于后两种,即根据当前已知的数据对未来链路进行预测,寻找到理论上效率最佳的传输方案,或是通过主动创造连通条件增加传输成功的概率。但是,预测链路信息和主动创造条件两种方法都会增加算法的复杂度和开销;同时由于节点之间交互的状态信息会占用有限的带宽而增加网络的负担,因此在 DTN 路由算法设计的过程中如何节约资源消耗和提高数据的传递效率是一个需要平衡的问题。

另外,目前 DTN 路由策略主要是针对某一个特定的应用场景而设计的,因此不具有普适性。从长远来看,如何更好地扩大路由算法的适用范围也是研究者们需要考虑的问题之一。

结束语 DTN 是继 Internet 体系结构之后,人类关于电信网络技术的一次新探索,也是未来无线通信的重要组成部分。未来 DTN 的研究和发展将对军事战争、航天通信、抢险救灾等诸多领域产生十分深远的影响,并且对未来智能、融合、通用及无缝覆盖的网络发展有着积极的推动作用。对近年来的研究成果进行分析总结,并结合目前 DTN 发展面临的阻碍,笔者认为以下几方面研究内容有可能在今后的一段时间里成为研究的热点问题。

1)与 IP 网络的融合

基于 TCP/IP 协议的 IP 网络经过很长一段时间的发展后,已经取得了很大的成就,很多理论已经应用到了实际中并且取得了很好的效果。虽然这种网络很脆弱,在缺乏端到端通信链路的情况下会停止工作,同时 DTN 作为一种很好的解决方案能够应对复杂的网络环境,但是不可否认,目前根深蒂固的应用生态系统基本完全是基于传统的 IP 网络的。现阶段大多数应用无法在 DTN 网络中使用,是制约 DTN 发展的一个重要因素。因此,如何以一种透明的方式将 DTN 和传统的 IP 网络集成到一个基础架构中,从而使已有的应用程序不需要为了适应网络而做出更改,进而最大限度地减小对现有应用程序的潜在干扰,将会是 DTN 能否真正实现广泛应用不得不考虑的一个问题。

2)DTN 自身协议的优化

虽然 DTN 在受限网络中有着较为良好的表现,但是由于其特殊的“存储-携带-转发”模式,导致数据不得不缓存到 DTN 的 Bundle 层中之后再行转发,这就造成了额外的开销,因此在连接可靠的网络中 DTN 的性能远远不如 MANET 等其他基于 TCP/IP 的网络架构。同时,在现实应用场景中可靠连接存在的情况占据很大的比例,因此如何优化 DTN

体系架构是 DTN 发展道路上一个亟待解决的问题。

一些研究者已经意识到了这个问题,并且开始寻找解决方案,如 Kawamoto 等提出了一种将 DTN 与 MANET 混合的解决方案^[37]。该方案使用一种被称为 DTN over MANET 的体系架构,在不同的网络环境中,通过一系列决策判断选择 MANET 还是 DTN 作为网络架构来传递数据,以此来优化 DTN 的传输性能。

3)路由算法统一评价标准的建立

在 DTN 网络中,以最小的开销得到最佳的性能是许多研究者追寻的目标。但是由于 DTN 和 MANET 有着一套完全不同的体系架构,因此它们的性能评价标准也不尽相同,传统的 IP 网络以时延和丢包率作为网络性能的评价标准已经不能完全适用于 DTN 的评价。但是,目前 DTN 仍然没有一套统一的评价标准,导致很多路由算法在它们自己的评价标准下都能获得较为理想的性能,但是如果改变评价标准则其性能可能会达不到预期。因此,建立一套统一的评价标准是未来 DTN 研究的基础。

本文从 DTN 体系结构、工作原理以及路由算法 3 个方面对 DTN 的研究现状和关键技术进行了分析。自十多年前 DTN 出现到现在,研究者们发现其在地面上的应用场景更加丰富,尤其是在军事应用等诸多场景中 DTN 具有更为广阔的发展意义。经过多年研究,DTN 的发展已经趋于成熟,拥有了一套完善的体系结构,可以适应多种受限的网络环境,并且能够提供较为可靠的数据传输服务。对我国而言,紧跟 DTN 的国际研究步伐,并结合我国相关领域的实际应用需求,积极开展 DTN 基础理论研究和特定场景下的应用开发,具有非常重要的意义。

参 考 文 献

[1] BURLEIGH S,HOOKE A,TORGERSON L,et al. Delay-tolerant networking: an approach to interplanetary Internet [J]. IEEE Communications Magazine,2003,41(6):128-136.

[2] RODRIGUES J J P C,SOARES V N G J. An introduction to delay and disruption-tolerant networks (DTNs)[M]// Advances in Delay-Tolerant Networks (DTNs). 2015:1-21.

[3] SCOTT K,BURLEIGH S. Bundle Protocol Specification [EB/OL]. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5050.txt>.

[4] HU J H,ZHOU X W. Research on DTN architecture and its key protocols[C]// Geomatics Science and Technology. Xi'an: Air Force Engineering University,2010:1-8. (in Chinese)

胡佳慧,周贤伟. DTN 体系结构及其重要协议研究 [C]// 2010 国防空天信息技术前沿论坛论文集. 西安:空军工程大学,2010:1-8.

[5] UNNIKRISHNAN E,RAVICHANDRAN V,SUDHAKAR S, et al. Delay Tolerant Network for Space[C]// International Conference on Signal Processing and Integrated Networks. New York:IEEE,2016:591-595.

[6] BURLEIGH S, RAMADAS M, FARRELL S. Licklider Transmission Protocol-Motivation [J]. Optics Letters,2008,29(10):1051-1074.

[7] ZHAO K,WANG R,BURLEIGH S C,et al. Modeling memory-variation dynamics for the Licklider transmission protocol in

deep-space communications [J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems,2015,51(4):2510-2524.

[8] YU Q,BURLEIGH S C,WANG R,et al. Performance modeling of licklider transmission protocol (LTP) in deep-space communication[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems,2015,51(3):1609-1620.

[9] WU H,LI Y,JIAO J,et al. LTP asynchronous accelerated retransmission strategy for deep space communications[C]// IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments. New York:IEEE,2017:99-104.

[10] MCKIM J,JACKSON C,EDDY W. Using Saratoga with a Bundle Agent as a Convergence Layer for Delay-Tolerant Networking [EB/OL]. <http://tools.ietf.org/pdf/draft-wood-dtnrg-saratoga-07.pdf>.

[11] DEMMER M,OTT J,PERREAULT S. Delay-Tolerant Networking TCP Convergence-Layer Protocol [EB/OL]. <https://tools.ietf.org/html/rfc7242>.

[12] KRISHNAN R,BASU P,MIKKELSON J M,et al. The SPINDLE Disruption-Tolerant Networking System [C]// Military Communications Conference, 2007. New York: Milcom, IEEE, 2007:1-7.

[13] KAWABATA N,YAMASAKI Y,OHSAKI H. On Message Delivery Delay of Epidemic DTN Routing with Broadcasting ACKs [C]// IEEE, Computer Software and Applications Conference. New York:IEEE Computer Society,2017:701-704.

[14] SETH A,KROEKER D,ZAHARIA M,et al. Low-cost communication for rural internet kiosks using mechanical backhaul [C]// International Conference on Mobile Computing and Networking. New York:ACM,2006:334-345.

[15] DEMMER M,OTT J,PERREAULT S. Delay-Tolerant Networking TCP Convergence-Layer Protocol [EB/OL]. <https://www.rfc-editor.org/pdf/rfc/rfc7242.txt>.

[16] SHINKO I,ODA T,SPAHO E,et al. A Simulation System Based on ONE and SUMO Simulators: Performance Evaluation of First Contact, Prophet and Spray-and-Wait DTN Protocols [C]// International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications. New York:IEEE, 2015:137-142.

[17] SPYROPOULOS T,POSUNIS K,RAGHAVENDRA C S. Spray and wait: efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks [C]// Proceedings of ACM SIGCOM-M Workshop on Delay-Tolerant Networking. New York:AVM, 2002:252-259.

[18] SPYROPOULOS T,PSOUNIS K,RAGHAVENDRA C S. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the multiple-copy case [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking,2008,16(1):63-76.

[19] SISODIYA S,SHARMA P,TIWARI S K. A new modified spray and wait routing algorithm for heterogeneous delay tolerant network [C]// International Conference on I-Smac. New York:IEEE,2017:843-848.

[20] LINDGREN A,DORIA A,SCHELEN O. Probabilistic routing in intermittently connected networks [J]. Acm Skimobile Mobile Computing & Communications Review,2004,7(3):19-20.

[43] SARRAUTE C, BURRONI J. Using Neural Networks to improve classical Operating System Fingerprinting techniques[J]. Computer Science, 2008, 8(1): 35-47.

[44] AL-SHEHARI T, SHAHZAD F. Improving Operating System Fingerprinting using Machine Learning Techniques[J]. International Journal of Computer Theory & Engineering, 2014, 6(1): 57-62.

[45] TYAGI R, PAUL T, MANOJ B S, et al. Packet Inspection for Unauthorized OS Detection in Enterprises[J]. IEEE Security & Privacy Magazine, 2015, 13(4): 60-65.

[46] ZOU T Z, LI Y, ZHANG B F, et al. Operating system recognition based on support vector machines [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2009(s2): 2164-2168. (in Chinese)
邹铁铮, 李渊, 张博锋, 等. 基于支持向量机的操作系统识别方法 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009(s2): 2164-2168.

[47] CHEN S B, HU Y. Operating System Recognition based on Sin-

gular Value Decomposition and DAG_SVMS[J]. Information Security and Communications Privacy, 2013(9): 66-67. (in Chinese)
程书宝, 胡勇. 基于奇异值分解和 DAG_SVMS 的操作系统类型识别 [J]. 信息安全与通信保密, 2013(9): 66-67.

[48] YI Y H, LIU H F, ZHU Z X. Research of Passive OS Recognition Based on Decision Tree [J]. Computer Science, 2016, 43(8): 79-83. (in Chinese)
易运晖, 刘海峰, 朱振显. 基于决策树的被动操作系统识别技术研究 [J]. 计算机科学, 2016, 43(8): 79-83.

[49] SIMON K, MOUCHA C, KELLER J. Contactless Vulnerability Analysis using Google and Shodan [J]. Journal of Universal Computer Science, 2017, 23(4): 404-430.

[50] GENGE B, HALLER P, ENĂCHESCU C. Beyond Internet Scanning: Banner Processing for Passive Software Vulnerability Assessment [J]. International Journal of Information Security Science, 2015, 4(3): 81-91.

(上接第 23 页)

[21] YUSUKE I, TOSHIAKI M. A DTN routing algorithm adopting the “Community” and “Centrality” parameters used in social networks[C] // 2018 International Conference on Information Networking (ICOIN). New York: IEEE, 2018: 211-216.

[22] ALAOUI E A A, AGOUJIL S, HAJAR M, et al. Improving the data delivery using DTN routing hierarchical topology (DRHT) [C] // International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications. New York: IEEE, 2016: 1-5.

[23] ALAOUI S E, RAMAMURTHY B. Routing optimization for DTN-based space networks using a temporal graph model[C] // IEEE International Conference on Communications. New York: IEEE, 2016: 1-6.

[24] MTIBA A, MAYM, DIOTC, et al. People rank: social opportunistic forwarding [C] // Conference on Information Communications. New York: IEEE Press, 2010: 111-115.

[25] WANG G Z, YAN L J, ZHENG L, et al. Social routing based on location preference prediction in DTN[C] // 2017 11th IEEE International Conference on Anti-counterfeiting, Security and Identification (ASID). New York: IEEE, 2017: 154-157.

[26] LIU C, WU J. Routing in a cyclic mob space [C] // ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc NETWORKING and Computing. New York: ACM, 2008: 351-360.

[27] QI W, SONG Q, WANG X, et al. Trajectory Data Mining-Based Routing in DTN-enabled Vehicular Ad Hoc Networks[J]. IEEE Access, 2017, PP(99): 128-138.

[28] LIU J, TANG M, YU G. Adaptive Spray and Wait Routing Based on Relay-Probability of Node in DTN [C] // 2012 International Conference on Computer Science & Service System (CSSS). New York: IEEE, 2012: 1138-1141.

[29] WANG G Z, ZHENG L, YAN L J, et al. Probabilistic routing algorithm based on transmission capability of nodes in DTN[C] // 2017 11th IEEE International Conference on Anti-counterfeiting, Security and Identification (ASID). New York: IEEE, 2017: 146-149.

[30] HUANG Z, ZHANG Q, XIN X, et al. DTN routing algorithm based on service probability and limited copy for satellite networks[C] // International Conference on Optical Communications and Networks. New York: IEEE, 2017: 1-3.

[31] CONG L, YANG H, WANG Y, et al. Research on the Routing Algorithm of LEO-Satellite DTN Network Based on Multi-Attribute Decision Making[C] // International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. New York: IEEE, 2017: 166-171.

[32] HE J, XU C, WU Y. Resource-efficient routing protocol based on historical encounter time interval in DTN[C] // IEEE International Conference on Computer and Communications. New York: IEEE, 2017: 2026-2031.

[33] LIN F, WANG Y, WU H. Testbed Implementation of Delay/Fault-Tolerant Mobile Sensor Network (DFT-MSN) [C] // IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops. New York: IEEE, 2006.

[34] ZHAO W. A message ferrying approach for data delivery in sparse mobile ad hoc networks [C] // ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York: ACM, 2004: 187-198.

[35] ZHAO W, AMMAR M, ZEGURA E. Controlling the mobility of multiple data transport ferries in a delay-tolerant network [C] // INFOCOM 2005. Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. New York: IEEE, 2005: 1407-1418.

[36] ZHANG H, LU N, MA J, et al. HNSARA: A history-and-node-state-based active routing algorithm for DTN[C] // International Conference on Cyberspace Technology. England: IET, 2015: 1-5.

[37] KAWAMOTO Y, NISHIYAMA H, KATO N. Toward terminal-to-terminal communication networks: A hybrid MANET and DTN approach[C] // IEEE, International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks. New York: IEEE, 2014: 228-232.