移动容迟网络研究现状

朱涛，马伟建

**摘 要：**大量具备短距离通信能力的智能设备的出现推动了无线自组网应用的迅速发展。但在许多实际应用环境中，节点移动、网络稀疏或信号衰减等各种原因通常导致形成的网络大部分时间不连通。传统的移动自组织网络传输模式要求通信源和目标节点之间存在至少一条完整的路径，因而无法在这类环境中运行。移动容迟网络利用节点移动形成的通信机会逐跳传输消息，以“存储-携带-转发”的路由模式实现节点间通信，这种完全不同于传统网络通信模式的新兴组网方式引起了研究界极大的兴趣。本文首先介绍了移动容迟网络的概念, 并给出了当前移动容迟网络的一些典型应用, 然后详细阐述了移动容迟网络研究的热点问题，包括路由转发机制、移动模型和基于内容通信等,并简要叙述了移动容迟网络的可靠传输的保障机制、网络安全保障机制、节点协作机制等其他研究问题，最后进行总结并展望了移动容迟网络未来一段时间内的研究重点。

**关键字：**移动容迟网络 延迟容忍网络 路由协议 移动模型

# 引言

随着无线移动设备的增加以及用户对无线移动设备的钟爱，越来越多的工作于移动设备上的应用被开发出来，如MP3 播放器、手机、PDA等。这些移动设备通过自组织形成的网络较以往存在的网络有着很大的不同。这种网络具有：节点移动速度快、分布稀疏、拓扑变化频繁、底层链路间歇出现等特点，严重制约了传统的Internet或Ad-Hoc网络所采用通信技术在其中的应用。根据文献[1]的实验结果可以看出，在美国80号洲际公路上，网络连接的平均恢复时间(re-healing time)接近30秒。文献[2]中则指出：在平均速度为100公里/每小时的道路上，如果节点的覆盖半径250米，其链路存在15秒的概率仅为57%。

2003年Kevin Fall等人在SIGCOMM国际会议中，针对在不满足TCP/IP协议族基本假设（从源节点到宿节点不存在一条持续的端到端路径）的情况下如何进行网络互联互操作的问题，首次提出了延迟容忍网络（简称容迟网络，DTN）[3]这一概念。近年来，包括DARPA、IRTF、NASA等机构都在DTN网络体系结构、路由算法等方面开展了大量的研究工作[4]，并在星际网络[3]、战术通信网[5]、移动车载网[6]、口袋交换网[7]、野生动物监测传感网络[8]等典型场景中进行了部署和应用。

在DTN的研究当中，有一类我们称之为移动容迟网络（DTMN，Disruption Tolerant Mobile Network），这种网络主要指车载网络、战术网络等移动节点组成的网络，其较普通的DTN具有节点移动性更强的特点，也更加符合以上所述的应用场景。由于节点的移动性导致网络频繁割裂，连接频繁中断，消息传输的源节点到目的节点之间并不存在端到端的连接。目前的研究者在解决上述问题时，通常使用与传统的 “存储-转发”（store-forward）机制所不同的“存储-携带-转发”（store-carry-forward）[9-11]机制来完成消息的传递。

本文首先引入移动容迟网络的概念和应用，并对移动容迟网络研究的相关热点问题加以介绍，包括路由转发机制、节点移动模型和基于内容通信等，然后对其他研究问题，如可靠传输的保障机制、网络安全保障机制、节点协作机制等进行简单的叙述，再次对国内外致力于该领域的研究机构与研究者加以列举，最后总结全文并展望未来几年内的研究趋势。

# 概念与理论基础

目前移动容迟网络还没有一个统一的定义，本文通过综合现有的文献分析移动容迟网络的特点，给出一个描述性的定义：**移动容迟网络是一种节点间不存在端到端链路，也不依靠固定的基站转播，而是通过节点的不断移动携带并传播消息的特殊容迟网络**。图1是移动容迟网络的示意图。



**图1 移动容迟网络示意图**

如图1所示，在移动容迟网络中，源节点S期望将消息传递到目的节点D，但是网络中并不存在S到D的链路，消息只能靠节点间的移动而相互传播，最终投递到D，而担任消息携带及转播角色的节点为全网内所有节点F。

DTMN满足Kevin Fall等人对DTN体系结构的划分，在传输层与应用层之间构建bundle层[12]。面向异步消息传输的覆盖网，操作在不同网络的传输层上，bundle层提供和Intemet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[13]。

国内外较早提出移动容迟网络概念的有Kevin C. Almeroth等人、Elizabeth M. Daly等人及Yu Wang等人。虽然几个研究组均提出移动容迟网络的概念，但是他们的研究仍有侧重，分别从移动网络[14]，MANETs[4]和传感器网络[15]为切入点探索移动容迟网络的特性，下面就他们提出的概念加以分析。

## DTMN

文献[16, 17]是最早提出移动容迟网络（DTMN）概念的，文中指出DTMN是一种特殊的DTN，它假设网络中所有节点是移动的，并且网络中任意两节点间不存在端到端路径。在这种环境下，由于节点的稀疏和频繁移动，为了遵守DTN体系结构，每个节点被视为一个区域，同样的，每个节点扮演了一个DTN网关去执行在bundle层的消息传输。作者还就DTMN中节点提出两个关键的假设：

1、节点是盲目的，即节点不知道其他节点的任何有关状态、位置和移动模式的信息。

2、节点是自治的，即每个节点都是独自控制自己的运动，并不依靠外部控制。

## DDTM

文献[4, 18]正对频繁中断连接的MANETs网络的特性加以分析，总结了这类网络所面临的各种挑战，然后提出了不连通容迟移动自组网络（Disconnected Delay-tolerant MANETs，DDTM）的概念。这类网络自组织并且不依靠建立的基础设施。每个节点担任路由角色向其他节点传递消息。由于网络拓扑的中断，节点间在任意时刻可能不存在端到端通路，但是，端到端的时变连通图是存在的，并担负消息传输任务。其与传统的MANETs相比，没有基础设施的辅助，通信时没有端到端的链路。

## DFT-MSN

文献[15, 19-21]将DTN的概念运用到传统的无线传感器网络（WSN）中，用以解决因传感器节点频繁移动带来的高延时，高误码率等问题。继而提出了容迟容错移动传感器网络（Delay/fault-tolerant mobile sensor network，DFT-MSN）的概念。相较于传统的传感器网络，DFT-MSN具有以下特点：

1、节点移动，传感器节点和汇聚节点都是移动的，网络拓扑不断变化。

2、链接稀疏，联通度很低，传感器间只有很偶然的机会才能建立连接。

3、延迟容忍，数据传输能够容忍很大的延时。

4、错误容忍，少量的数据丢失不会影响整个网络的性能。

5、缓存受限，传感器节点的缓存有限，要求有一定的缓存管理机制。

# 相关应用

在自然环境下，很多应用领域都无法建立结构化的全连通网络，也很难保障节点间通信时存在端到端路径，这导致传统的多跳自组织网络协议无法运行，而移动容迟网络能够很好地满足这些应用需求。本章就移动容迟网络的一些典型应用加以列举，相信随着该领域研究的不断突破，会有更多的应用被发现。

## 军事自组网

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[3, 5]。

## 偏远地区民用网络

发展中国家或偏远地区的网络基础设施通常不够完善而不能接入互联网, 使用移动容迟网络技术能够提供非即时，但价格低廉、相对可用的网络服务。DakNet[22]是由MIT开发、部署在印度以及柬埔寨的偏远地区提供互联网服务的移动容迟网络。DakNet 包括 : 部署在村庄的Kiosk设备、公交车辆上的MAP(mobile access points)设备以及部署在城镇的互联网AP设备，这些设备之间使用Wi-Fi接口通信。村民通过PDA与Kiosk设备交换数据；往返农村和城镇的公交车经过Kiosk设备附近时，MAP 和Kiosk设备交换数据，当公交车到达城镇时，MAP 通过AP连接到互联网上传或下载数据。类似的系统还包括为芬兰北部的游牧民族提供信息服务的Saami Network Connectivity[23]等。

## 野生动物跟踪

在大范围的野生动物追踪应用中，移动容迟网络比传统mesh结构的静态传感器网络更具优势。ZebraNet[8]是一个由普林斯顿大学设计，用来追踪非洲草原斑马的移动容迟网络系统。该系统由安装在斑马脖子上的低功耗传感器和移动基站组成。传感器收集斑马的迁徙数据， 并与相遇的斑马传感器交换数据，研究人员定期开车携带移动基站穿越追踪区域收集数据。SWIM(shared wireless infostation model)[24]是一个监视海洋鲸鱼的水下移动容迟网络。嵌入在鲸鱼身上的特殊Tag 周期性地收集监控数据，当两头鲸鱼相遇时，它们的Tag 相互通信并交换数据，每头鲸鱼不仅存储自身数据，也携带了相遇的其他鲸鱼的数据，通过鲸鱼的移动，数据被复制并扩散在不同的鲸鱼上，直至到达部署在水面浮标或飞过的海鸟身上携带的基站。

## 手持设备自组网及移动社交网络

随着手机、PDA等手持设备的大量普及，利用手持设备组网实现数据交换和提供网络服务具有广阔的应用前景。剑桥大学和Intel 研究院提出的PSN(pocket switched network)[7]是由人随身携带的手持设备形成的移动容迟网络，每个设备节点既可以通过人们相遇带来的局部通信机会，也可以通过Wi-Fi或GPRS(general packet radio service)等接入Internet 的全局连接转发数据。当目标节点位于当前节点附近区域或不能接入Internet，或者用户应用需要很高的带宽和很小的延迟时，局部连接能比全局连接提供更好的服务。

另外，人们期望社交网站，例如Facebook，LinkedIn，Twitter以及其他一些网站可以移动应用。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，而不需要互联网联通。在Haggie Project[25, 26]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。此外，类似的项目还有The Million People Project[27]和The SocialNets[28]等。

## 智能高速公路

随着配备短距离无线接口车辆的增多，行驶在道路上的车辆由于速度快，密度不均匀形成了一个移动容迟车载网络. 这种网络在交通事故预警、路况检测、拥塞预报等交通安全应用中具有巨大的潜力。此外，利用车辆与路边接入点的容迟通信可以提供Internet 访问和商业应用等。CarTel[29]是MIT 开发的基于车辆传感器的信息收集和发布系统，能够用于环境监测、路况收集、车辆诊断和路线导航等。安装在车辆上的嵌入式CarTel 节点，负责收集和处理车辆上多种传感器采集的数据，包括车辆运行信息和道路信息等。使用Wi -Fi 或BlueTooth 等通信技术，CarTel 节点在车辆相遇时可以直接交换数据，同时，CarTel 节点也可以通过路边的无线接入点将数据发送到Internet上的服务器。此外，在公交车[30]、私家车[31]以及自行车[32]上具有较为广泛的应用。

# 研究热点与技术手段

目前，移动容迟网络的研究热点包括3个方面：路由转发机制、节点移动模型和基于内容通信。

## 路由转发机制

路由转发机制是任何组网技术的核心问题。在移动容迟网络中，由于源节点与目标节点之间不存在完整的端到端链路，从而无法利用已有的路由协议。移动容迟网络中路由机制以“存储-携带-转发”的模式取代了传统的“存储-转发”模式。在这种模式下当路由表中不存在去往目标节点的下一跳节点时，将消息在当前节点上缓存，并随着当前节点的移动以等待合适的转发机会。针对每个消息确定最好的下一跳转发节点和选择合适的转发时机就成为设计高效移动容迟网络路由协议的关键问题。

本文根据路由转发机制的不同，将移动容迟网络中的路由技术分为7类：基于复制、基于编码、基于上下文信息、基于预测、基于分簇、基于先验知识和基于小世界模型。有关移动容迟网络路由技术的分类如图2所示。



**图2 移动容迟网络路由技术分类**

### 基于复制

该机制中，同一消息会存在一个或多个副本，当其中之一到达目标节点时，消息传输成功。其中最简单的是直接传输（direct transmission, 简称DT）[33]，直接传输是指源节点或者移动某个中继节点携带消息，直到进入目的节点的通信范围并将消息投递给目标节点。这种路由降低了类似泛洪的路由算法带来的大量的资源需求，然而由于没有充分利用网络的连接机会，从而带来了非常大的端到端延时。与之相对应的是传染病路由（epidemic routing）[34]，每个节点维护一个消息队列，当两个节点相遇时，交换对方没有存储的消息。它本质上是一种洪泛算法，每个携带消息的节点都将消息转发给所有遇到的邻居节点。如果网络的带宽和缓存等资源足够，该机制可以保证找到到达目标节点的最短路径，而由于实际网络节点带宽和缓存等资源有限，随着网络节点数的增大，其性能由于广播导致的拥塞会急剧下降。

移动容迟网络中单纯运用以上路由策略的较少，大多是基于以上策略的改进，并与改进前的算法进行比较，得到较好的性能提高。文献[14]给出了适用于移动容迟网络的受控洪泛算法，算法基于4个方面的考虑：1、基于概率（BP）：根据节点的主动性不同，节点选取下一跳有一定概率；2、生存时间（TTL）：转发剩余跳数为0时则丢弃；3、终止时间（KT）：消息时间戳，时间一到，清除消息；4、被动治愈（PC）：最终节点收到信息后发出“治愈”数据包，治愈被感染的节点。

### 基于编码

基于编码的路由机制将待传输数据编码成相互冗余的消息，目标节点仅需要接收到部分编码后的消息，即可通过消息之间的运算重建原数据。Wang 等人提出了一种基于擦除编码（erasure-coding，简称 EC）[15, 20, 21]的路由机制。源节点先将原始数据分成m个块，然后将这些数据块编码成k个小消息，目标节点只需要接收到k个消息中的任意个小消息就可重建原始数据，是由具体编码算法确定的小常数。该机制中源节点将编码后的小消息平均分配给k个相遇的中继节点，每个中继节点携带部分小消息直到遇到目标节点。该算法保证了网络连接最差情况下的性能，但在网络连接足够好的时候却不能充分利用连接机会，因为每次相遇没有考虑相遇持续时间，只传输固定数目的小消息。其中文献[15] 提出两种简单并且高效的DFT-MSN数据传输模式：基于响应的高效数据传输策略（RED）和基于消息失败容忍的自适应数据传输策略（FAD）。RED策略利用擦除编码技术来完成在最小化开销的情况下达到要求的数据传输率。它由数据传输和消息管理两个关键部分组成。前者通过投递概率（传感器能将消息传达到汇聚节点的概率）决定何时何地进行消息传输，后者则基于当前传输率决定最优的擦除编程参数（包括数据块的数量和需要的冗余）。FAD策略则利用消息的容错性这一消息的重要特性，为达到最小化开销，FAD策略将决定消息是否传输或者丢弃。

### 基于预测

在移动容迟网络中，节点间的相遇总是有一点机会相遇的，所以正确的预测下一次节点间相遇的概率将会给消息的传输带来性能上的极大提升。

在基于相遇预测的机会转发机制中，每个节点都维持一个与目标节点相遇的预测概率. 可以通过节点的历史移动轨迹来预测该概率. 在ZebraNet[8]提出的基于移动历史的转发机制中，每个动物身上的传感器节点维持了一个到达基站的概率，当传感器随动物移动到基站通信范围内时，该概率值增加，否则，该概率值随时间的推移而逐渐降低。当两个传感器节点相遇时，概率低的节点将自身消息转发给概率高的传感器节点。

基于链路的概率转发机制考虑节点之间的“端到端”的链路状态来选择转发节点。尽管移动容迟网络中不一定存在端到端的完整路径，但通过收集单跳链路状态估算出的端到端路径的有用性仍可作为转发决策依据。一些机制利用链路的平均可用性来估算单跳链路状态。文献[35]就利用网络拓扑信息进行链路预测，从而设计并实现了GLP算法。文献[36]所提出的全连接路由算法更注重节点间新建立的连接而不是旧的连接，并进而引入计时器和更快的缓存释放机制。

### 基于上下文信息

此外，还可以使用节点能量、移动速度、节点密度以及位置信息等更为广泛的上下文参数来计算节点效用值。Context-Aware Routing(CAR)协议[37]使用的上下文属性包括: 剩余能量、拓扑变化速率、到达目标连通域的概率和移动速度等。当不存在端到端路径时，节点通过综合上下文信息，联合得到其效用值，其效用函数采用卡尔曼滤波方法加以预测, 并选取具有最大效用值的节点作为候选节点，以增加消息成功分发概率。同时，利用时间序列分析理论根据节点属性历史数据预测属性值，以此综合计算节点效用值。文献[38]在传感器网络中引入CAR协议，设计实现SCAR协议，该协议能够利用传感器节点的移动与资源预测技术的融合，从而达到随时随地敏锐感知到数据正确方向的效果。

### 基于分簇

由于移动容迟网络存在网络分割现象，但是会出现区域化现象。类比传统网络自治域的概念，文献[17, 39]考虑将整个网络分割为若干个小的区域，称为簇。其中文献[17]构建簇内节点存在端到端路径，可以应用传统Ad-hoc路由技术，簇与簇之间通信则依赖簇间信使，同时设计了一套专门的信使策略在区域间传输消息束。文献[39]则将具有相似移动特性的移动节点划分为一个簇，在簇内节点可以交换各自的资源以减少开销和负载平衡，从而在DTMN中达到高效、可扩展的路由。

### 基于蚁群算法

蚁群算法是一类模拟蚂蚁觅食的群智能算法，具有分布式、正反馈、启发性等特点，被广泛用于解决优化问题。文献[40]采用蚁群算法解决移动容迟网络下的空时路径搜索问题，首先基于空时路径预测算法构建全局的空时拓扑图；然后设计与实现启发式的蚁群搜索算法，搜索出具有较优解的空时路径集合，最后对算法的性能及收敛性进行分析，验证建模与预测方法的有效性。

### 基于小世界模型

SimBet算法[18, 41]是一种基于社会网络分析技术的路由算法，社会网络呈现出小世界现象，具体地说，该算法是一种基于节点自私的中间状态集中性(betweenness centrality) 与节点社会相似性(similarity) 的路由算法。若目的节点对于传输节点或接触是不知的，则为了增加消息传输的概率，消息被传输到更具有集中性的节点。

## 节点移动模型

节点移动模型描述了节点的移动模式，包括位置、速度等特征的变化，广泛应用于自组网协议性能的分析和评价，是自组织网络的基础研究之一。传统的MANET 假设网络是全连通的，节点的移动对路由层以上的协议是“屏蔽”的。因此一般从网络拓扑角度去分析移动模型对协议性能的影响，如拓扑连通率、节点连通度等，而移动容迟网络中的移动模型研究是以刻画节点相遇特征为核心的。这是因为在移动容迟网络中的数据传输依赖于节点移动带来的相遇机会，而节点的相遇概率和相遇时间分布是由节点的移动模型决定的。因此，相比于传统的MANET，移动模型对移动容迟网络研究更加重要[42]。

### 理论模型及其延伸

经典的独立同分布移动模型有三个：Random Way Point(RWP)，Random Walk(RW)和Random Direction(RD)，其中尤以RWP更加符合实际的运动。在DTN研究领域，这3中模型常被用来作为节点运动的场景以分析和评价路由协议。文献[36, 43]给出了基于改良的RWP模型下的路由算法。研究了该模型下节点移动速率、通信距离、节点数量、消息有效时间、场景尺寸等对算法性能的影响。

### 基于热点地区的移动模型

现实情景中，由于融入偏好信息，节点的移动不再是独立同分布的经典情况，而是由一些固定特性组成的分布情况，比如，热点区域。即某时刻或某一段时间较多节点会汇聚到一个区域，导致该区域节点密度增大，连通度增大等。文献[44]在RWP模型的基础上提出了热点模型，并分析了该移动模型下的连接特性。

## 基于内容通信

由于移动容迟网络以存储-携带-转发模式传输数据，每个转发节点都会缓存转发的消息，这种特征使得内容存储成为移动容迟网络的核心服务。与传统组网将存储认为是应用层功能特性不同，移动容迟网络将存储和路由机制结合在一起管理，支持基于内容的组网，即网络中消息的流动是由内容驱动，而不是以分组为单位。这类研究主要集中在传感器网络中，因为传感器网络的核心目的是信息的收集，采用订阅/发布机制后的基于内容的信息收集可以加快消息的汇聚。

Mascolo等人[45]针对车载移动网络提出了一个基于周期性广播的数据分发算法。该算法中，携带事件消息的车辆周期性地广播该消息，同时在单跳范围内广播事件的元数据并收集所有邻居节点对该事件的订阅请求，然后将订阅车辆按照行驶方向划分在不同的簇，并将消息转发给驶向订阅节点最多簇的车辆。当连续k次轮询都出现特定个数的订阅节点时，在消息转发到新车辆后，原消息不删除并继续广播；反之，当连续k次轮询都没有订阅节点时，当前消息从网络中删除。文献[46]提出了移动容迟网络上的发布订阅系统。订阅节点将订阅请求和上下文信息在周围k 跳节点上分发，上下文信息包括节点移动性、与相遇兴趣的其他节点的连接情况和能量等，用来计算节点转发事件消息的utility。当一个事件消息产生时，依次按照确定性订阅请求、节点 utility 和随机选择的顺序选择合适的邻居节点转发事件消息到订阅节点。

# 其他研究问题

除以上热点问题外，有关移动容迟网络其他方向的研究也逐渐受到关注，如：可靠传输的保障机制、网络安全保障机制、节点协作机制等。

## 可靠传输保障机制

由于节点的强移动性，链路的频繁中断，在移动容迟网络中很难保障消息的可靠传输。传统网络中，节点的可靠传输依靠运输层保障，但是这些协议不再适用于DTN体系结构。Khaled A. Harras等人分析了移动容迟网络中传输层的问题，并籍此提出了一种保障可靠传输的机制[16]。文中介绍四种不同的端到端可靠传输保障方法：

1、点到点：可靠性仅仅依赖于沿着路径中的每个节点发送确认数据包。

2、主动接收，在移动容迟网络中通过投递一个主动的端到端确认确保可靠性。

3、被动接收：可靠性通过网络暗地发送一个端到端确认。

4、网桥接收：移动容迟网络中向其他平行的网络发送确认。

## 网络安全保障机制

移动容迟网络利用节点的移动形成相遇并通信，网络节点不可控制，对数据的机密性和完整性、路由安全性等带来更大的挑战。Asokan等人研究了身份密码学(identity-based cryptography) 在移动容迟网络中的适用性[47]，结果表明，身份密码学在认证和数据完整性方面并不比传统加密机制要好，但更有利于保护数据的机密性。Alaeddine 等人则首次研究了移动容迟网络中Epidemic Forwarding机制的漏洞[48]，并验证了恶意攻击该路由机制很难实现，攻击结果取决于网络场景，如节点密度和移动性等。

## 节点协作机制

移动容迟网络的一个隐含的假设是所有节点都愿意协作，帮助其他节点转发消息。而在实际网络中，如果整个网络属于同一个组织，如监控野生动物的机会传感器网络，节点可自然实现协作传输。对于更普遍的属于不同实体的节点组成的自组织网络，需要研究一般的协作机制以保证网络传输服务质量。

Levente等人提出使用“物物交换”的原理[49]，两个进入通信范围的节点基于各自获得的利益为对方传输消息，任何一方出现自私行为，对方可取消此次交易。文献[14]对移动容迟网络中的节点的主动性加以定量分析，利用节点的转发间隔、成功投递消息数和重传等待时间计算出节点的主动性指标，在消息传播时会根据邻居节点的主动性指标选择是否转播或者只是部分转播。

# 相关研究机构与研究者

目前，国内外专注于研究移动容迟网络的机构和个人还比较少，大多都是研究容迟网络或机会网络，但是会对其延伸的移动容迟网络有所涉及。就所发表的相关文献来看，主要有如下几个研究机构。

## 美国加利福尼亚大学圣塔巴巴拉分校计算机科学学院

该学院的Khaled A. Harras和Kevin C. Almeroth所领导的研究小组是较早将DTMN作为DTN中较为突出的一个子属领域提出的研究团队。继Kevin Fall等人于2003年前后提出DTN的概念后，该小组在2005年到2006年间发表了几篇论文详细阐述了DTMN的概念、特性等，并给出了一些作用于DTMN中的路由策略[14, 16, 17]。

## 爱尔兰都柏林大学圣三一学院计算机科学学院

该学院的分布式小组，以Elizabeth M. Daly和Mads Haahr为核心多年致力于研究移动容迟网络(DTNs)与移动自组网络(MANETs)结合(即移动容迟网络，但其简称为DDTMs)的特性。早期，结合社会网络的一些特性分析、总结了移动容迟网络的信息流与路由等特点[18, 41]。2010年又对这类移动容迟网络所面临的挑战做了更为详尽的分类和综述[4]。

## 美国路易斯安那州立大学先进计算机研究中心

该小组致力于研究容迟/容错移动传感器网络(DFT-MSN)，成员主要包括：Yu Wang，Hongyi Wu，Ha Dang，Feng Lin等人。2005年到2007年间，就DFT-MSN网络的数据汇聚方法、数据传输模式、分析评估、仿真模拟等发表数篇文献[15, 19-21]，是国内外较早将容迟容错的概念融入移动传感器网络中的科研小组。

## 英国伦敦大学学院计算机科学学院

该小组致力于研究一种对环境敏感的自适应路由算法，使其适用于这种具有高移动特性的容迟网络，即DTMN。成员主要包括：Paolo Costa，Cecilia Mascolo，Mirco Musolesi和 Gian Pietro Picco等。其前后发表文献将其设计的路由算法经过适当调整分别适用于移动容迟传感器网络[38]、移动容迟Ad-hoc网络[50]和移动网络[37]。

## 中国浙江大学航空航天学院

该小组从移动模型切入对移动容迟网络进行研究。小组成员主要有：李晖，郁发新，周小玲，罗浩等人。先后发表文献提出了基于改进RWP移动模型下的全连接路由[36, 43]和基于热点模型的DTMN连接分析[44]。

## 中国北京航空航天大学计算机学院

该小组常年致力于DTN、DTMN、机会网络、挑战网络及相关领域的研究工作，主要研究者有夏春和和王海泉等人。近期发表的文献中直接与DTMN有关的主要有蚁群算法在DTMN中的应用[40]和分组预测算法的实现[35]等。

## 其他研究机构及研究者

除以上研究机构及研究者外，还有较多致力于DTMN领域的研究者。如：

* 电子科技大学（成都）计算机学院的朱金奇，刘明，龚海刚等人和香港理工大学计算机学院网络和移动计算实验室的曹建农、Yuan Zheng，Guihai Chen等人。
* 美国伊利诺伊大学科学实验室 ：Eitan Altman，TamerBasar和Francesco De Pellegrini等人。
* 美国特拉华大学 计算机信息科学学院：Ozcan Koc，Justin Yackoski和Chien-Chung Shen等人。
* 法国综合理工大学及麦考瑞大学（澳大利亚）计算机学院：Philippe Jacquet，Bernard Mans，和Georgios Rodolakis等人。
* Annamacharya Institute of Technology & Sciences（印度）计算机学院：T.Hari Krishna， Dr.A.Ananda Rao和Dr.A.Subramanyam等人。

此外可能还有广大科研工作者和研究机构致力于DTMN领域的研究，鉴于笔者能力有限，未能完全列举。

# 结论与展望

移动容迟网络是未来无线网络技术研究的一个前沿热点领域，其不需要源节点和目标节点之间存在完整链路，利用节点移动实现通信，作为一种全新的组网方式，在很多领域存在着巨大的潜力，并对于实现未来普适计算具有重大影响。

我们预计移动容迟网络领域未来一段时间内研究的重点方向包括：（1）DTMN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结合考虑，将会长期成为容迟网络研究领域的热点问题；（2）由于手持设备的普及，结合社会网络理论研究手持设备形成的移动容迟网络移动模型与高效转发机制的研究；（3）设计移动容迟网络与集中式网络，如蜂窝网或WLAN的混合式网络应用系统；（4）结合特定应用，如水下传感器网络数据收集、车载网络信息分发等，研究跨应用层、网络层甚至 MAC层等多层的优化通信协议；（5）研究通用的通信中间件，以支持不同应用服务运行。

**参考文献**

[1] Wisitpongphan N, Fanbai, Mudalige P, et al. On the routing problem in disconnected vehicular adhoc networks[C]. 2007.

[2] Rudack M, Meincke M, Lott M. On the dynamics of ad hoc networks for inter vehicle communications (IVC)[J]. 2002.

[3] Fall K. A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets[Z]. Karlsruhe, Germany: 200327-34.

[4] Daly E M, Haahr M. The challenges of disconnected delay-tolerant MANETs[J]. Ad Hoc Networks, 2010, 8(2): 241-250.

[5] Burbank J L, Chimento P F, Haberman B K, et al. Key Challenges of Military Tactical Networking and the Elusive Promise of MANET Technology [J]. Communications Magazine, IEEE, 2006, 44(11): 39-45.

[6] Sede M, Li X, Li D, et al. Routing in Large-Scale Buses Ad Hoc Networks[C]. 2008.

[7] Hui P, Chaintreau A, Scott J, et al. Pocket switched networks and human mobility in conference environments[C]. New York, NY, USA: ACM, 2005.

[8] Juang P, Oki H, Wang Y, et al. Energy-efficient computing for wildlife tracking: design tradeoffs and early experiences with ZebraNet[J]. SIGARCH Comput. Archit. News, 2002, 36(5): 96-107.

[9] Burleigh S, Hooke A, Torgerson L, et al. Delay-tolerant networking: an approach to interplanetary Internet[J]. Communications Magazine, IEEE, 2003, 41(6): 128-136.

[10] Chuah M C, Ma W. Integrated Buffer and Route Management in a DTN with Message Ferry[C]. 2006.

[11] Zegura S M M A. Routing in Space and Time in Networks with Predictable Mobility[J]. 2004.

[12] Chrobak M, Gasieniec L, Kowalski D. The wake-up problem in multi-hop radio networks[C]. Philadelphia, PA, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2004.

[13] 樊秀梅，单志广，张宝贤，等. 容迟网络体系结构及其关键技术研究[J]. 电子学报, 2008, 36(1): 161-170.

[14] Harras K, Almeroth K, Belding-Royer E. Delay tolerant mobile networks (dtmns): Controlled flooding in sparse mobile networks[J]. NETWORKING 2005. Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; Mobile and Wireless Communications Systems, 2005: 41-91.

[15] Wang Y, Wu H. Delay/fault-tolerant mobile sensor network (DFT-MSN): a new paradigm for pervasive information gathering[J]. Mobile Computing, IEEE Transactions on, 2007, 6(9): 1021-1034.

[16] Harras K, Almeroth K. Transport layer issues in delay tolerant mobile networks[J]. NETWORKING 2006. Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; Mobile and Wireless Communications Systems, 2006: 463-475.

[17] Harras K A, Almeroth K C. Inter-regional messenger scheduling in delay tolerant mobile networks[C]. 2006.

[18] Daly E M, Haahr M. Social network analysis for routing in disconnected delay-tolerant MANETs[C]. New York, NY, USA: ACM, 2007.

[19] Hongyi W, Yu W, Ha D, et al. Analytic, Simulation, and Empirical Evaluation of Delay/Fault-Tolerant Mobile Sensor Networks[J]. Wireless Communications, IEEE Transactions on, 2007, 6(9): 3287-3296.

[20] Wang Y, Wu H. Replication-Based efficient data delivery scheme (RED) for delay/fault-tolerant mobile sensor network (DFT-MSN)[C]. 2006.

[21] Wang Y, Lin F, Wu H. Efficient data transmission in delay fault tolerant mobile sensor networks (DFT-MSN)[C]. 2005.

[22] Pentland A, Fletcher R, Hasson A. DakNet: rethinking connectivity in developing nations[J]. Computer, 2004, 37(1): 78-83.

[23] Doria A. Providing connectivity to the saami nomadic community[C]. 2002.

[24] Small T, Haas Z J. The shared wireless infostation model: a new ad hoc networking paradigm (or where there is a whale, there is a way)[C]. New York, NY, USA: ACM, 2003.

[25] Su J, Scott J, Hui P, et al. Haggle: seamless networking for mobile applications[C]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.

[26] Scott J, Crowcroft J, Hui P, et al. Haggle: A networking architecture designed around mobile users[J]. 2006: 78-86.

[27] Nardi B A, Schiano D J, Gumbrecht M. Blogging as social activity, or, would you let 900 million people read your diary?[C]. New York, NY, USA: ACM, 2004.

[28] Jaho E, Karaliopoulos M, Stavrakakis I. ISCoDe: a framework for interest similarity-based community detection in social networks[C]. Shanghai, China: 2011.

[29] Hull B, Bychkovsky V, Zhang Y, et al. CarTel: a distributed mobile sensor computing system[C]. New York, NY, USA: ACM, 2006.

[30] Balasubramanian A, Zhou Y, Croft W B, et al. Web search from a bus[C]. New York, NY, USA: ACM, 2007.

[31] Chen Z D, Kung H T, Vlah D. Ad hoc relay wireless networks over moving vehicles on highways[C]. New York, NY, USA: ACM, 2001.

[32] Esbjörnsson M, Juhlin O, östergren M. The Hocman Prototype - Fast Motor Bikers and Ad Hoc Networking[J]. 2002.

[33] Grossglauser M, Tse D N C. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks[J]. Networking, IEEE/ACM Transactions on, 2002, 10(4): 477-486.

[34] Becker V D. Epidemic routing for partially connected ad hoc networks[J]. Technique Report, CS-2000-06, Department of Computer Science, Duke University, Durham, NC, 2000.

[35] Wu J, Xia C, Lv L, et al. GLP: A Group Link Prediction Algorithm in DTMNs[Z]. 2010V2-V197.

[36] Li H, Yu F X, Zhou X L, et al. Every Connection Routing under Modified Random Waypoint Models in Delay Tolerant Mobile Networks[J]. Information Technology Journal, 2010, 9(8): 1686-1695.

[37] Musolesi M, Mascolo C. CAR: Context-Aware Adaptive Routing for Delay-Tolerant Mobile Networks[J]. Mobile Computing, IEEE Transactions on, 2009, 8(2): 246-260.

[38] Mascolo C, Musolesi M. SCAR: context-aware adaptive routing in delay tolerant mobile sensor networks[C]. 2006.

[39] Harikrishna T, Subramanyam A, Aits R. Clustering and Cluster-Based Routing Protocol for Delay-Tolerant Mobile Networks[J]. International Journal of Advanced Research in Technology, 2011.

[40] Pengxiu Z, Haiquan W, Chunhe X, et al. ACRP: Ant-Colony-based Routing Protocol for DTMNs[Z]. 2010V2-V272.

[41] Daly E M, Haahr M. Social Network Analysis for Information Flow in Disconnected Delay-Tolerant MANETs[J]. Mobile Computing, IEEE Transactions on, 2009, 8(5): 606-621.

[42] 熊永平，孙利民，牛建伟，等. 机会网络[J]. 软件学报, 2009, 20(1): 124-137.

[43] 李晖. 移动容迟网络中基于改进随机路点模型的移动连接路由[J]. 吉林大学学 报 (工学版), 2011, 41(Sup 1).

[44] Li H, Yu F X, Zhou X L, et al. Connections characteristics analysis in delay tolerant mobile networks[C]. 2010.

[45] Leontiadis I, Mascolo C. Opportunistic spatio-temporal dissemination system for vehicular networks[C]. New York, NY, USA: ACM, 2007.

[46] Baldoni R, Beraldi R, Querzoni L, et al. Content-based routing in highly dynamic mobile ad hoc networks[J]. International Journal of Pervasive Computing and Communications, 2005, 1(4): 277-288.

[47] Asokan N, Kostiainen K, Ginzboorg P, et al. Applicability of identity-based cryptography for disruption-tolerant networking[C]. New York, NY, USA: ACM, 2007.

[48] El Fawal A, Le Boudec J, Salamatian K. Vulnerabilities in Epidemic Forwarding[J]. 2006.

[49] Buttyan L, Dora L, Felegyhazi M, et al. Barter-based cooperation in delay-tolerant personal wireless networks[C]. 2007.

[50] Costa P, Mascolo C, Musolesi M, et al. Socially-aware routing for publish-subscribe in delay-tolerant mobile ad hoc networks[J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 2008, 26(5): 748-760.