移动环境下缓存资源的优化分配与分发机制

目录

第一章 绪论 3

1.1课题研究背景 3

1.2课题研究的目的与意义 5

1.3课题主要研究内容 6

1.4论文结构 7

1.5本章小结 7

第二章 D2D移动网络与协作缓存 9

2.1 移动D2D通信技术 9

2.1.1移动通信技术 9

2.1.2 D2D通信技术 11

2.2 D2D移动网络内容分发问题 15

2.2.1 D2D移动网络内容分发问题概述 15

2.2.2 D2D移动网络内容分发问题研究现状 15

2.2.3移动 D2D 内容分发现存问题 16

2.3区域协作缓存机制 17

2.3.1网络环境 17

2.3.2 网络中的数据传输方式 17

2.3.3 基于区域协作缓存的D2D内容分发机制 19

2.4本章小结 20

第三章 缓存区域数量及位置的确定方法 21

3.1基于移动趋势分析的缓存区域位置预测方法 21

3.1.1获取节点地理位置与移动趋势信息 22

3.1.2缓存预置区域数量 23

3.1.3缓存区域潜在范围 25

3.1.4确定全部缓存区域位置 27

3.2理论计算及仿真实验 29

3.2.1实验环境 29

3.2.2理论计算分析规划多缓存区域的必要性 30

3.2.3实验分析基于移动趋势确定区域位置的必要性 32

3.3本章小结 33

第四章 缓存资源的分配与部署方法 34

4.1 问题概述 34

4.2基于区域协作的缓存资源分配方法 34

4.3缓存中继传输与部署方法 35

4.3.1随机线性网络编码 35

4.3.2到达缓存区域前的中继节点选择方法 37

4.3.3缓存区域内的缓存部署方法 40

4.4仿真实验 42

4.4.1实验环境 42

4.4.2实验结果及分析 43

4.5本章小结 44

第五章 基于区域协作的内容分发与区域位置修正方法 45

5.1问题概述 45

5.2基于区域协作的缓存内容分发方法 45

5.3区域位置修正机制 47

5.3.1内容分发过程中的区域位置修正机制 47

5.3.2内容分发失败时的终点区域规划方法 49

5.4仿真实验 50

5.4.1实验环境 50

5.4.2实验结果与分析 51

5.5本章小结 53

第六章 总结与展望 54

# 第一章 绪论

## 1.1课题研究背景

随着现代社会通信技术的不断发展，全世界的联系比以往任何时候更加紧密了，及时有效的信息交互对于人们来说显得愈发重要。有数据表明，截止2014年10月，全球的移动用户总数突破了 42亿，已经成为世界最重要的通信手段。尤其是近年来，随着移动互联网的爆炸式增长，无线数据业务的网络传输率以及网络的吞吐量都上升到了一个新的数量级，不断发展的高速无线多媒体业务对网络的承载能力要求也大大提高，对现有的无线通信系统带来了巨大的挑战。以传统基站为中心的蜂窝系统存在着明显的不足，需要引进新的技术来获得更高的网络传输速率以及网络吞吐量。

在这种背景下，国际标准化组织(3rd Generation Partnership Project， 3GPP )提出了第三代移动通信系统，以及以 LTE(Long Term Evolution)、LTE-A(Long Term Evolution Advanced)和下一代宽带蜂窝移动通信系统(International Mobile TelecommunicationsAdvanced， IMT-A)为代表的第四代通信系统，其在边缘覆盖、传输速率、低时延、移动性方面都有了长足的发展。但是用于移动通信的频谱资源的稀缺以及移动设备电池容量的不足，使得以基站为中心的传统蜂窝系统的发展遇到了瓶颈，亟待解决。

针对移动通信系统中的资源利用效率不高，带宽不足的现象，已有广泛的研究。目前己经存在一些无线通信技术可以缓解整个无线网络数据传输速率低，资源利用效率低的问题。例如：蓝牙，基于WiFi的直接局部通信(WiFi-Direct)都是在没有蜂窝网络设备的情况下进行直连通信，可以对蜂窝网络的数据流量进行分流，减轻网络的压力。基于WiFi-Direct的通信是在没有无线路由器的辅助下，无线设备处于地理位置较近的组成一个临时小组，采用非授权频段进行数据的传输，减轻了蜂窝网络的压力。但是该技术也有非常明显的缺陷：首先，在非授权频段ISM (工业、科学和医疗)下进行通信，受到的干扰无法控制，进而无法保证通信的完成质量。其次，Win传输模式属于异步传输模式，全局同步较少，设备使用的时候功耗较大。最后，WiFi Direct的链接过程是先要建立通信链路才能判断是否是目标传输方，这种方式在密集的通信情景下会造成频繁的建立通信链路，释放通信链路的过程，增加了设备的能耗负担。

为此国际标准化组织3GPP提出在下一代宽带蜂窝移动通信系统IMT-A中引入终端直通D2D (Device-to-Device)技术作为传统蜂窝网络的有效补充手段。

本文中的D2D通信指的是在地理上相距较近的终端用户之间可以直接进行数据的传输，进行数据传输的过程不需要基站来进行转发，同时由于距离较近，可以获得较高的传输速率以及较小时延，基站可以控制D2D通信所使用的无线频谱资源以及发射功率。在近距离进行通信时，终端设备之间的发射功率也较小，对整个系统造成的干扰也较小，同时消耗的能量相对于传统方式减少很多，弥补了终端设备电池电量有限的缺点，延长了网络的生存时间，同时降低了基站的服务压力。

与上面提到的蓝牙，WiFi-Direct等短距离通信技术相比，D2D通信技术的特点如下：

D2D通信技术是与蜂窝系统同时存在，D2D通信技术的空口设计也与蜂窝系统的空中接口相一致。

D2D通信技术的通信过程是在基站的统一调度下完成的。基站可以为D2D分配正交的频率资源来减少D2D通信与蜂窝通信之间的干扰。

在蜂窝系统下的D2D通信，终端设备间的通信不需要进行配对以及身份验证，通过基站的统一管理，只要向基站进行申请即可。

D2D通信技术应用在传统蜂窝网络后，能够对本地通信业务有较大的提升，尤其是近距离通信。比如音乐会、电影院播放电影、开演唱会，主办方需要给众多观众提供视频、音频、介绍材料、等多媒体服务，或者在旅游景点，需要给游客传送景点相关介绍材料。使用 D2D 通信分发内容可以减轻蜂窝网络的通信压力。

D2D 通信方式在提供通信便利的同时，在内容分发方面也存在着一些固有的问题。尤其在移动网络环境下，D2D 网络相对蜂窝网络来说低得多的通信范围，使其更容易发生通信中断的故障。即两个终端在进行 D2D 通信的同时不间断移动，当移动使得两个终端的距离超出 D2D 连接的通信范围时，连接就会中断，而数据也难免会发生丢失。缓存作为一种提高计算机系统数据性能的有效机制，已被广泛的应用在计算机的软硬件系统上。在移动网络中，缓存技术被广泛使用以提高网络系统的性能。在流媒体应用中，用户节点得到请求流媒体数据后，在播放的同时将该数据缓存到缓存空间。该缓存一方面可以使视频能够流畅的播放，另一方面当用户在一段时间内再次点播已经缓存过的视频时，流媒体客户端软件会直接从缓存文件中取数据，而不用重新下载数据。而在 D2D 移动网络中，利用缓存可以避免连接中断导致的数据丢失问题，同时一个节点中的缓存资源也可以提供给其他节点进行下载，而无需向基站发起请求。

但是在移动D2D网络环境中，使用传统的缓存技术并不能完全解决内容分发时存在的可靠性低与传输效率差的问题。节点的移动导致网络拓扑不稳定，无法确保缓存数据能及时分发至请求节点处。因此，合理的利用缓存技术，优化缓存的分配及分发机制，对于提升移动D2D的内容分发效率，有着重要的意义。

## 1.2课题研究的目的与意义

D2D通信技术作为为国际标准化组织3GPP提出在下一代宽带蜂窝移动通信系统IMT-A中引入的关键技术，其对比通过基站进行通信的优势有：

D2D通信一般在近距离时进行传输，能够获得较高的数据传输速率，同时消耗较低的功耗；

D2D通信用户之间距离较近的特性可以对频谱资源在小的空间内实现复用，提高系统的频谱利率；

D2D通信技术的使用能够满足本地数据业务的低时延要求，使得基站服务区内能够支持更多类型的数据服务；

同时通过在蜂窝系统中引入D2D通信技术，能够扩大基站的覆盖范围，提升整个系统的容量。

综上可见，D2D能够获得较高的数据传输速率、较高的频谱利用率、较低的时延以及扩大蜂窝系统的服务区域，因此对于D2D通信技术的研究能够促进下一代通信技术的发展。

由于移动 D2D 网络具有节点移动频繁、通信范围受限的特点，在进行内容分发时，易出现因节点移动使得两节点间距离超出通信范围而导致通信中断的问题。而使用多节点、区域的协作缓存机制来解决该问题，是目前的研究热门。如何解决缓存资源的分配、分发问题，则是协作缓存研究的关键。因此，研究移动 D2D 网络中缓存资源的协作优化分配及分发机制，对于提升 D2D 内容分发效率与可靠性有着重要的意义，同时对于下一代通信技术的发展有有着重要的推动作用。

## 1.3课题主要研究内容

移动无线 D2D 网络中的工作模式是“存储-携带-转发”的方式，由于D2D 通信范围有限，且网络中节点移动频繁，因此传统移动网络和 D2D 固定网络的路由算法与缓存机制均不能完全适用与移动无线 D2D 网络。本文为了解决移动无线 D2D 网络的内容分发问题，研究了现有的机会路由机制与协作缓存机制，提出了一种基于移动趋势预测的区域协作缓存机制，根据请求节点的移动趋势，提前将所需数据缓存到请求节点未来移动路径附近的优化区域，并由区域内节点协作分配缓存资源。其实现包含缓存区域预测、中继缓存节点选择、区域内缓存资源分配等主要模块。主要工作有：

研究了如何确定缓存预置区域。根据请求节点的移动趋势与数据源节点的地理位置可以确定请求节点能够接收到数据的最近位置。由 D2D 通信带宽和请求数据包的数据量可以计算出所需缓存区域的数量。由上述条件可计算出本次请求所需缓存区域的具体位置。

研究了如何确定携带缓存的中继节点。在缓存预置区域确定之后，需要选择中继节点携带数据到达缓存区域。具体选择方法为每隔一个固定时隙，缓存节点依据移动趋势与地理位置在通信范围内的节点中选出 n 个最佳的移动节点作为中继节点。同时，在中继节点到达缓存区域之后，采用广播的方式迅速将数据扩散到缓存区域中。

研究了如何利用多区域协作来完成缓存内容分发。多个缓存区域各自负责一部分缓存数据的存储与转发。若缓存资源为流媒体，则请求节点每经过一个区域并获得该区域缓存的数据后，都可以立即观看该部分流媒体资源，而无需等待全部资源传输完成。同时，每个区域也存储其他区域的资源，并通过多区域协作弥补可能出现在中继传输过程中的数据丢失问题。

## 1.4论文结构

本文的结构如下：

绪论。概述本文的研究背景、研究目的及意义，介绍了移动D2D通信技术以及内容分发问题的国内外研究现状及发展趋势，提出了区域协作缓存机制并分析缓存部署过程中的主要问题，给出了本文研究内容以及结构安排。

移动D2D网络与区域协作缓存。介绍了移动 D2D网络的概念、特点、典型应用及发展趋势。对D2D 移动网络中的内容分发问题及其国内外研究现状进行了分析，并提出本文区域协作缓存的解决方案。

基于移动趋势预测来确定缓存区域数量及位置。介绍了使用区域缓存的目的及意义，给出了获取节点信息、基于数据包大小确定缓存区域数量、基于请求节点移动趋势分析来确定缓存区域位置的方法。通过理论计算与仿真实验，验证了使用多个区域和通过分析请求节点移动趋势来确定区域位置的必要性。

缓存部署过程中的中继节点选择方法。介绍了将请求数据从数据源节点部署到缓存区域内的总体流程，给出了部署过程中的中继节点选择方法和区域内的缓存数据部署方法。通过仿真实验验证了该中继节点选择方法在可靠性和资源利用率上相比广播均有一定优势。

区域协作资源分配与分发方法。介绍了区域协作的目的与意义，给出了基于多区域协作的资源分配方法、面向请求节点的内容分发方法和基于区域协作的区域位置修正机制。搭建系统仿真，在不同网络条件下与 GeRaF 机制进行对比，验证在移动 D2D网络中，本文区域缓存机制在可靠性及内容分发效率方面具有一定优势。

总结与展望。对全文的工作进行了总结，对提出方案和与之相应的改进方向进行了扩展分析。

## 1.5本章小结

本章节中介绍了本文的研究背景、目的及意义，对移动 D2D 通信技术及其内容分发问题的国内外研究现状及发展趋势进行了概述与分析。针对现存问题提出了区域协作缓存机制的解决方案，并介绍缓存分配与分发过程中主要需解决的问题。给出了本文研究内容及结构安排。

# 第二章 D2D移动网络与协作缓存

## 2.1 移动D2D通信技术

蜂窝通信经历了从第1代以话音业务为代表的模拟式移动电话系统，到正大规模商用的第4代（4G）以移动数据、移动计算及移动多媒体为代表的无线宽带系统的持续演进。当前阶段，随着智能终端的快速普及以及网络通信容量的爆炸式增长，面向5G的无线通信技术的演进需求也更加明确及迫切，开始受到业界极大关注。  
　　在面向5G的无线通信技术的演进中，一方面，传统的无线通信性能指标，比如网络容量、频谱效率等需要持续提升以进一步提高有限且日益紧张的无线频谱利用率；另一方面，更丰富的通信模式以及由此带来的终端用户体验的提升以及蜂窝通信应用的扩展也是一个需要考虑的演进方向。作为面向5G的关键候选技术，设备到设备通信（Device-to-Device，D2D）具有潜在的提高系统性能、提升用户体验、扩展蜂窝通信应用的前景，受到广泛关注。

### 2.1.1移动通信技术

在过去的十几年里，我国移动通信技术得到了迅猛的发展，如图2-1所示移动通信技术发展演变，从最初的模拟通信技术到数字通信技术再到现在传输高速数据的3G系统。移动技术的更新换代给世界带来天翻地覆的变化。丰富多样功能齐全的手机终端给人们的生活带来了极大的便利。由图2-1简单介绍移动通信的演进过程。

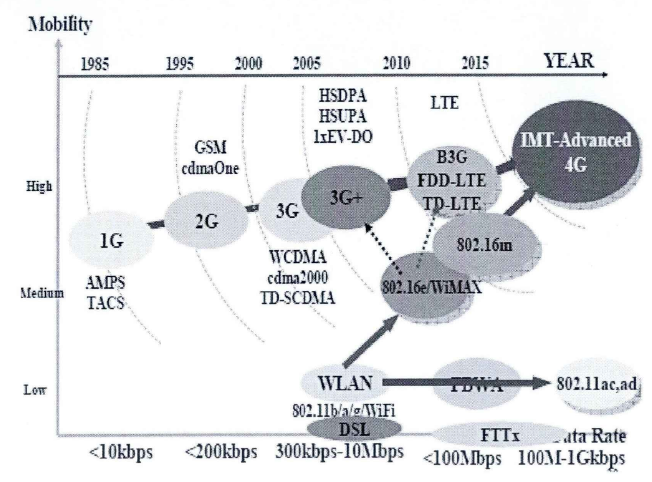


图2-1 移动通信演进过程

第一代移动通信系统(1G)是基于模拟技术的。在上个世纪五六十年代，AT&T的贝尔实验室和一些其他的通信公司发展了蜂窝无线电话的原理和技术。通过在地域上将覆盖范围划分成一个个小单元，每个单元复用频带的一部分以此来提高频谱的利用率，也就是在干扰受限的环境下，利用适当的频率复用规划(特定地区的传播特性)和频分复用(FDMA)来提高容量。从而在真正意义上实现了蜂窝移动通信。但是第一代移动通信系统由于业务量小，质量差，没有加密，速度低等缺点，没有得到广泛的应用。

第二代移动通信系统(2G)是基于数字无线电技术的，它不但能够提供更高的网络容量与更好的通话质量，而且提升了通信的保密性，也可以为用户提供无缝的国际漫游。当今世界市场的第二代数字无线标准包括GSMJS-95CDMA、PDC、和D-AMPS等。与第一代移动通信系统相比，第二代移动通信系统具有以下特点：频谱利用率高、抗干扰能力强、保密性好、提供业务丰富等特点。由于数字移动通信技术的引入使得移动通信迅速发展，逐渐成为市场的主导。

第三代移动通信系统(3G)是在第二代通信系统基础上提供了更快的传输下载速度和更好的宽带多媒体业务，同时能够实现全球范围内的无线漫游、视频会议、收发邮件等业务，并且与第二代移动通信系统具有良好的兼容性。在室外最高传输速度达到384kbps(千比特/每秒)，在室内可达到至少2Mbps(兆比特/每秒)。第三代通信系统根据不同技术标准主要分为以下三种：WCDMA、cdma2000、TD-SCDMA，由我国大力研发的TD-SCDMA技术在国际上也得到广泛应用。

第四代移动通信系统技术包括LTE (Long Term Evolution，长期演进)和WiMax(Worldwide Interoperability for Microwave Access，全球微波互联接入)。LTE 项目是3G技术的演进，LTE和WiMax无线网络演进的标准都是采用OFDM (正交频分复用)和MIMO (多输入多输出)技术，这两种技术对提升系统频谱利用率具有很大作用。LTE系统在20MHz频谱带宽下可达到下行lOOMbit/s与上行50Mbit/s的峰值速率，能够改善小区边缘用户的性能，提高小区容量和降低系统延迟。未来这种技术标准还将不断提高。

### 2.1.2 D2D通信技术

下一代宽带蜂窝移动通信系统（IMT-Advanced）中采用了载波聚合（CA）技术、增强的多入多出（MIMO）天线技术、协同多点传输（CoMP）技术和中继技术，在原有蜂窝移动通信系统的基础上，进一步提高了系统容量，改善了小区边缘用户的数据速率和用户体验。

然而，由于蜂窝通信系统以基站为中心的小区覆盖和业务提供方式本身所存在的局限性，IMT-Advanced 系统仍存在覆盖和容量等方面的问题。尽管中继技术及 CoMP 技术能够提高小区覆盖性能，增强小区边缘用户体验，然而由于基站及中继站不具有移动性，网络结构和业务支持的灵活性仍然不够，系统覆盖及小区边缘用户容量仍有较高的提升空间。

另外，随着无线多媒体业务的发展，当前日益增长的本地数据共享业务需求给 IMT-Advanced系统的容量和覆盖以及服务灵活性提出了较高要求，以基站为中心的小区业务提供模式在适应本地业务的发展方面有明显的局限性。

D2D（Device-to-Device）通信，即终端直通通信，是一种在系统控制下允许邻近的终端在近距离范围内使用蜂窝频谱资源通过直连链路进行数据传输的新型技术。 在蜂窝系统中使用 D2D 通信技术时，蜂窝通信网络与 D2D 通信网络构成了混合网络，其通信场景如图 2-2 所示。系统中不仅存在传统的蜂窝基站、蜂窝用户，也存在进行的直连和转接的 D2D 用户，这种网络的融合已经引起了广泛的关注和研究，如 Mesh 网中的兼容和通信流程等研究。本文中 D2D 技术专指与蜂窝系统共享使用授权频带资源的终端直通技术，形成统一的混合网络。

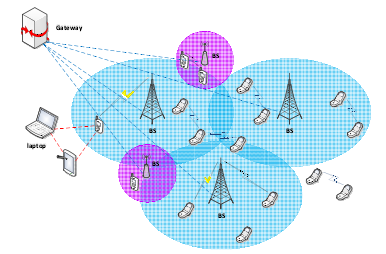


图2-2 D2D通信场景

D2D 技术本身的短距离通信特点和直接通信方式使其具有如下优势：

（1）终端近距离直接通信方式可实现较高的数据速率、较低的延迟和较低的功耗，在衰落环境下，可以通过有效的优化方案控制蜂窝用户通信中断概率，显著地提高系统吞吐量；

（2）利用网络中广泛分布的用户终端以及 D2D 通信链路的短距离特点，可以实现频谱资源的有效利用，获得资源空分复用增益，能在现有蜂窝通信系统的基础上进一步提高频谱效率，在一定程度上能够缓解无线通信系统频谱资源匮乏的问题；

（3） D2D 的直接通信方式能够提供具有灵活适应能力的数据服务，特别是本地通信中的数据共享等。在无线 P2P、文件共享和信息分享等业务方面能灵活满足业务的本地数据共享需求；

（4） D2D 直接通信能够利用网络中数量庞大且分布广泛的通信终端以拓展网络的覆盖范围，使一些无法通信的地区得到信号覆盖，进行通信。而且在灾难场景下，可以通过 D2D直接通信建立连接，恢复部分通信用户。

虽然 D2D 与传统的短距离通信技术均为通信短距离直连技术，但有其不同之处。主要区别在于，D2D 是一种干扰可控的通信技术。现有的短距离通信技术如蓝牙、WiFi Direct、Zigbee 等为自组织形式下使用系统非授权频带 ISM 进行数据直接传输的技术，与蜂窝网络之间相对独立，而非授权频带干扰不受控制，无法保障通信链路质量。

认知无线电网络通过 underlay 方式复用频谱资源时，需要时刻感知空闲频谱并适时进行切换，以防影响主系统中用户通信，而 D2D 资源分配受系统控制，终端监测操作实现较易，因此具有更广阔的发展前景。

（Ad-Hoc）以终端直通技术为基础，无论在通信方式还是网络结构上都具有极大的灵活性和可扩展性，但其应用仍然有一定的局限性。由于其纯粹的分布式结构，这类网络难以实现干扰控制，终端缺乏对网络全局信息的了解，不适合应用于业务量和干扰很高的通信环境；终端只能通过简单的相互竞争以统计时分复用方式共享无线资源，导致资源使用率较低；由于基于纯分布式结构的通信机制与蜂窝通信差异巨大，融合难度较高。而相比较而言，D2D 技术可以在系统的控制下进行通信，与现有蜂窝网络融合过程较易进行。

从应用价值来讲，3GPP SA1中把D2D的业务分成了2大类：公共安全和商业应用。图2-3展示了D2D通信的业务分类示意图。

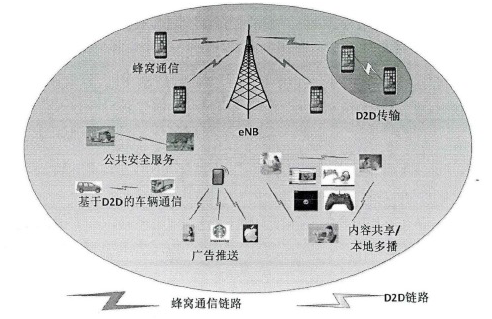


图2-3 D2D通信的业务分类

（1）公共安全

D2D通信在公共安全方面的应用是指发生火灾、地震等自然灾害的情况下，传统蜂窝网络不能正常工作时，允许终端之间不经过蜂窝网络的控制直接进行通信。传统蜂窝网络在发生自然灾害情况下的通信状况很糟糕，一是通信设备的损坏，救援人员与受灾地区的通信很可能无法建立;二是通信链路的拥堵，受灾地区的突发通信需求通常较大，分配给应急通信的资源常常被压缩;H是通信方式的限制，由于通信制式太少，在突发业务较多的时候不能及时切换到其它通信制式，容易产生丢包、掉话等现象，不能保证通信的顺利进行;四是受灾地区常常缺乏先进通信方式的专业人才，如果设备不能自适应的进行通信连接、制式间切换等，当通信中断的时候，无法与救援人员建立有效的沟通，造成公共通信资源的浪费。所W，传统蜂窝通信方式由于基站位置固定的限制，在紧急情况发生时，无法满足应急通信的需求。为了进一步提高公共安全下的通信保障，D2D通信的应用，可以在传统公共通信网络无法正常使用的时候进行紧急通信和数据互传，提高公共安全的可靠性。

（2）商业应用

商业应用场景可分为对等通信和中继通信。对等通信的应巧场景主要包括：

1)现场推送。现场推送指的是在蒋定的场合中针对目标用户群，通过应用D2D通信技术给目标用户群发送即时推送信息。

2)内容共享、本地交互。内容共享、本地交互指的是在短距离范围内的用户通过D2D通信方式将彼此感兴趣的音乐、图片、视频、游戏等信息进行巧享和交互。如近距离用户么间互相交换移动终端侧的信息、抖及多人进行近距离的实时游戏。3)基于物联网的业务。建立在物联网基础上，采用D2D通信技术来完成近距离的用户之间的信息交互。如基于D2D通信技术的车联网、智能家居、智慧医疗通信技术等。

中继通信的应用场景主要包括;

1)在安全监控、智能家居等用户为网关的短距离无线通信中，传输数据可以通过D2D通信技术来完成。D2D通信比起其他短距离无线通信有更高的安全性并且能够提供更好的服务质量。

2)弱/无覆盖区域的用户中继传输。允许信号质量较差的用户寻找到附近的用户，并且建立D2D通信链路进行数据传输，能帮助扩展网络覆盖、提高系统容量。

## 2.2 D2D移动网络内容分发问题

### 2.2.1 D2D移动网络内容分发问题概述

随着多媒体技术与移动网络的不断发展，传统的无线蜂窝网络已无法满足用户对于带宽的需求。业界提出了D2D连接使得移动终端可以互相交换数据，辅助蜂窝网络进行内容分发。然而无线移动D2D网络既有传输速度快、通信资费低的优点，也存在通信范围受限，网络拓扑多变的缺点。当网络中的节点移动较为频繁时，D2D通信可能会因节点移动出通信范围而中断，进而导致内容分发失败。因此，研究移动 D2D内容分发问题的关键是解决节点移动导致的网络拓扑不稳定、通信时间受限等问题。

### 2.2.2 D2D移动网络内容分发问题研究现状

目前针对D2D移动网络内容分发问题主要有两种解决思路：(1)请求发生前预测可能被请求的数据，并提前部署缓存资源；(2)请求发生后筛选合适的中继节点，通过中继节点移动携带缓存或多跳传输完成内容分发。

第一种思路综合考量全网中的节点与数据资源，使用特定机制优化缓存资源部署位置，此种方式特点是未雨绸缪，主动优化资源部署而不依赖请求信息，协作缓存方法是其中的代表。文献“Social-Based Cooperative Caching in DTNs： A Contact Duration Aware Approach”中提出根据“中心度”来优化缓存部署的协作缓存机制。 “中心度”是由节点的地理位置、连接度等参数综合计算而来，用来判断该节点可能参与传输的概率。“中心度”数值会随节点移动而变化，网络中的资源部署因此保持着动态优化，由此可缓解D2D网络中节点频繁移动的问题。该方法的缺点是小区内的资源分布不平均，在靠近小区边缘的区域缓存资源较为匮乏，若请求节点在此发起请求，则很难在短时间内获得足够的资源。参考文献“Age-based cooperative caching in information-centric networks”提出了一种基于内容流行度以及网络拓扑的协作缓存策略，主要思路是根据数据报文距离内容提供端的跳数和数据的流行度来确定报文的生存期以及报文存储的位置。但并没有给出流行度的计算方法以及网络拓扑图的更新方式。参考文献“ICN中的一种协作缓存机制”提出在转发兴趣报文的过程中记录沿途经过的节点信息（如节点状态，请求频率等），命中节点根据请求报文携带的路径上所有节点的状态信息，利用动态线性规划，计算出最优的内容缓存位置。这种方法具有中心处理方式的弊端，在决策节点的计算开销也不小。同时，上述方法有一个共同的缺陷，即不能仅通过D2D通信来完成内容分发，并保证可靠性。在缓存内容在网络中较稀少时，该类方法只能通过基站通信或传统路由的方式来完成内容分发。

第二种思路主要研究在请求开始后如何筛选最佳的中继节点，代表方法是机会路由。机会路由充分利用无线信道的广播特性，基于特定测度自动选择每跳中的最佳中继节点。利用无线媒介的广播特性，机会路由主要从两个方面来提高无线多跳网络的吞吐量：一是增加单跳传输的可靠性;二是减少端到端传输跳数。 同时，机会路由方法根据每一跳传输完成后的结果来选择最佳中继节点，以此可解决节点移动的随机性问题。但该方法每一跳传输时均需将资源广播至通信范围内的全部节点，对信道与节点缓存空间有着极大的浪费。除机会路由外，文献“Mobility Increases the Capacity of Ad Hoc Wireless Networks”提出由数据源节点每隔一段时间将所携带数据交由距离最近的节点，并借此提升网络中缓存副本数，进而增大与请求节点通信的几率。此种方法充分利用了节点的移动来减少通信次数，节省了信道资源。但缺点是牺牲了内容分发的速度，无法保证在较短时间内完成请求。

### 2.2.3移动 D2D 内容分发现存问题

尽管针对移动 D2D 内容分发的内容分发问题已有了广泛的研究，但大多数的研究均无法只用 D2D 通信来完成内容的分发，并保证可靠性。在某些没有蜂窝网络或其带宽资源很频发的网络环境下，缺少仅通过 D2D 通信就能保证可靠性的内容分发机制。

同时，至今尚无一种解决方案可以兼顾内容分发的速度、可靠性与资源利用率。机会路由的内容分发速度较快，但存在严重的信道与节点资源浪费；基于小区的协作缓存策略资源利用率较高，但无法仅用 D2D 通信来保证内容分发的可靠性；利用节点携带缓存的机制资源利用率较高，但是要牺牲内容分发的速度。因此，设计一种综合考虑内容分发速度、可靠性与资源利用率的机制是很有必要的。

## 2.3区域协作缓存机制

本文综合参考了机会路由与协作缓存机制的思路，提出了一种基于区域协作缓存的 D2D 内容分发机制，在请求发生后通过分析节点移动趋势来预先部署缓存资源，同时根据移动节点的移动方向与地理位置等信息筛选最佳的中继节点组，可在仅使用 D2D 通信传输数据的基础上，保证内容分发的速度、可靠性，并且避免区域内资源分布不均和资源浪费。

### 2.3.1网络环境

本文机制所讨论的网络环境如下：在一定区域内，有一座基站B，其余均为移动节点M。基站可与每一个通信范围内的移动节点进行通信，移动节点之间可通过D2D技术通信。移动节点的移动方式类似人类或车辆，有一个具体的目的地，但是行进路线并不确定。

由于网络中节点移动频繁，D2D通信易中断，因此在进行D2D通信时，接收端直接将数据缓存至自身缓存空间中，防止通信中断导致全部数据丢失。

### 2.3.2 网络中的数据传输方式

由于移动D2D网络中，既存在蜂窝网络，又有D2D网络，因此网络中存在三种数据传输方式：基站直接传输方式、基站协作传输方式和移动节点协作传输方式。

如图2-4所示，基站直接传输方式（s->b->d）是由数据源节点直接与基站发起连接，通过远距离传输将数据传给基站，并在基站接收到数据后继续通过远距离传输将数据发送给请求节点。在基站和移动节点相隔较远时，信道带宽较小、传输速率较慢、能源消耗量大。但是通过此种连接方式能保证连接不会因节点移动而中断，传输可靠性高。

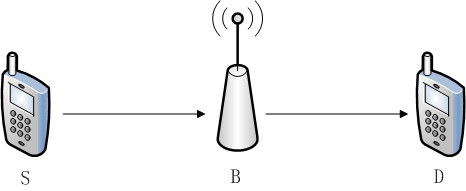


图2-4基站直接传输方式

如图2-5所示，基站混合传输方式（s-> m->b->d）是由数据源节点将数据发送给移动中继节点，并由移动中继节点交替携带缓存数据直到与基站的距离小于一定范围，此时再将数据发送给基站。基站在接收到数据之后通过直接传输或利用回程线路将数据传输给请求节点。由于基站与移动节点的距离小于一定范围时，传输速度较快且节省发射功率，因此效率较直接远距离连接移动节点有所提升。

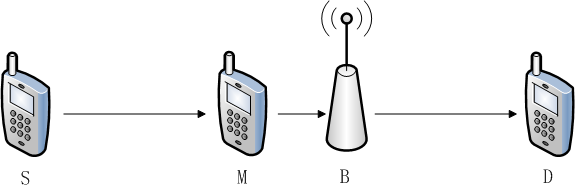


图2-5基站混合传输方式

如图2-6所示，移动节点协作传输方式（s->m->d）是由数据源节点将数据缓存给处于连接范围内的一组移动中继节点，该组移动中继节点继续将缓存数据传递给其他可能与请求节点发起连接的移动节点直至传输完成。该方式完全不借助基站，而是通过合理利用移动节点的移动和缓存能力，将数据缓存提前部署到请求节点可能到达的区域，进而通过多节点协作将数据传递给请求节点。

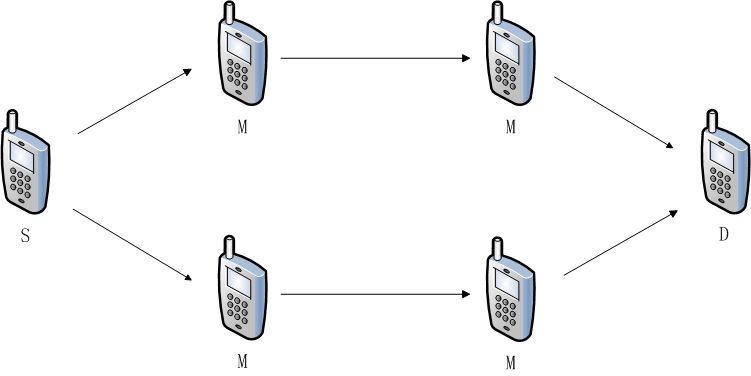


图2-6移动节点协作传输方式

三种传输方式各有优劣，可单独使用也可同时工作。由于大部分关于移动D2D网络内容分发问题的研究均采用多种传输方式结合的方法，难以在保证可靠性的前提下放弃基站通信。因此，本文重点研究不借助基站传输数据的内容分发方法。通过结合移动节点协作传输方式与区域协作缓存，保证内容分发的效率与可靠性。

### 2.3.3 基于区域协作缓存的D2D内容分发机制

由于移动D2D网络中的节点存在大量的移动，且D2D通信范围有限，使用常规的内容分发方式很可能由于拓扑变化或节点移动超出通信范围而导致请求失败。因此，合理的预测并利用节点的移动，提前分析出请求节点可能接收到缓存的位置，并挑选合适的移动中继节点向该位置传输数据是很有必要的。否则会出现移动节点在把数据携带到之前请求节点的位置后，却发现请求节点已经移动到另一位置而导致传输失败的情况。基本思路如下：

根据请求节点的移动趋势信息和请求数据信息，获取所需的缓存预置区域的数目与位置；根据所述请求节点的移动趋势信息，获取中继节点，所述中继节点用于在所述请求节点到达所述缓存预置区域之前，将所述请求节点请求的数据携带至所述缓存预置区域；当所述请求节点到达所述缓存预置区域后，在每个缓存预置区域获取部分的请求数据，并通过所有的缓存预置区域协作来获得全部的请求数据。

所述区域协作缓存机制通过利用移动节点的移动趋势和缓存能力来减轻移动随机性对传输带来的影响，并减轻基站的传输负担。在分配和分发缓存资源时，存在三大关键问题：（1）如何根据请求节点移动趋势和所请求数据来规划缓存预置区域；（2）如何选择合适的中继节点，接力携带缓存资源并部署至缓存区域内；（3）如何通过区域协作实现缓存数据合理分配与分发，并在必要时修正区域位置。

解决上述三个问题是区域缓存机制能否有效运转的关键，也是本文的主要研究内容。

## 2.4本章小结

本章节介绍了移动D2D网络的发展与特点，分析并总结了其内容分发问题的理论基础与研究现状，给出了区域协作缓存的解决思路，并提出了在缓存资源分配与分发过程中的三个关键问题。

# 第三章 缓存区域数量及位置的确定方法

在D2D移动网络中配置缓存资源时，第一步要做的就是确定所需缓存的数据和具体位置。传统的缓存位置确定方法多是基于连接度、中心度、缓存资源热度等信息，综合全网请求被动规划。而本文提出的缓存位置确定方案则是通过预测请求节点的移动趋势，在其未来移动路线上主动规划缓存区域。相比传统方案，本文的缓存区域预测方法对于每次请求都很有针对性，同时更适用于D2D无线移动网络环境。

## 3.1基于移动趋势分析的缓存区域位置预测方法

D2D无线移动网络具有节点移动频繁、通信范围受限的特点，现有的缓存位置确定方法并不能完全适用。

目前针对协作缓存的研究中，基于资源热度及网络相对位置的缓存位置确定方式较为热门。该类算法综合考量全网请求的数据和节点位置信息，将热度更高的资源部署在网络中更好的位置上，以达到提升内容分发效率的效果。此种方法的特点是优质资源的请求较易完成，但不能保证每一次请求都能利用协作缓存完成内容分发，较稀缺的资源仍需通过基站完成传输。同时，资源的热度统计具有滞后性，在最初热度增长的时候，网络中有大量的请求但缓存资源并未配置到位，对内容分发成功率有较大影响。

因此，本文设计了一种主动地、基于移动趋势预测的区域缓存位置确定方法。基本思路是在请求节点的未来移动路线上确定若干个缓存区域，每个区域内缓存一部分被请求的数据资源，在请求节点到达区域前将缓存资源部署到区域内。当请求节点到达某个区域时，便可以与区域内的缓存节点发起数据传输请求，下载该区域内的缓存数据。进而当请求节点按预定路线经过全部缓存区域后，即可完成该次数据请求。

本文算法相比传统算法的优势在于：（1）根据每次数据请求规划不同的缓存预置区域，对不同的数据一视同仁，均有较好的内容分发效率，不会因资源较为冷门而无法完成请求；（2）通过预测请求节点的移动趋势，在其未来行进路线上部署缓存资源，可以解决请求节点移动带来的传输滞后问题；（3）在多区域内部署缓存资源，可以提高请求节点与缓存节点的相遇概率，防止请求节点移动趋势预测偏差或改变行进路线导致无法获取到缓存数据。

具体的缓存预置区域算法流程如下：

获取全网节点地理位置信息并预测请求节点移动趋势；

根据D2D通信带宽与请求数据量大小计算出所需的缓存区域个数；

根据请求节点移动趋势和数据源节点地理位置计算出缓存预置区域的潜在选择范围；

确定各缓存预置区域的具体位置。

### 3.1.1获取节点地理位置与移动趋势信息

本文所述的缓存预置区域确定方法是基于移动趋势预测与分析的，因此需要获得全网节点的当前地理位置、当前移动终点、当前移动方向、平均移动速度等物理信息，并据此预测节点的移动趋势。

要获取上述节点信息，需要网络中的移动节点终端具备以下功能：

（1）装有全球定位系统（GPS， Global Positioning System），以获取节点地理位置与移动速度信息；

（2）可随时连接蜂窝网络，以上传节点数据；

（3）安装区域缓存的定制APP。

算法所需APP的功能主要是与用户交互，具体为：

（1）当用户加入或离开区域协作缓存网络时，通过APP发布信息；

（2）用户在APP中输入自己的移动终点位置；

（3）接入地图数据，在地图上显示用户的预测移动路线，可由用户确认是否会经过某一位置，或手动选择一定会经过的某一位置。

通过GPS可收集到移动节点的物理运动信息，通过APP可收集到用户的移动趋势反馈信息，两者结合即可获得算法所需的基本信息。接下来更重要的问题是如何预测节点的移动趋势。

由于在不同的移动模型下，移动节点的行为有所不同，因此移动趋势的预测需要根据不同的网络移动模型采用不同的方法。

在较为理想的无遮挡环境（例如草原、广场）或直线道路环境（例如高速公路、地铁、火车）等环境中，移动趋势可直接根据节点当前的移动方向与终点位置来确定。当终点位置与移动方向一致时，用户移动行为趋近于直接运动，移动趋势即为当前位置与移动终点的连线。当节点移动方向与移动终点不在一条直线上时，该节点的移动趋势近似于一条连接当前位置与终点的抛物线，而抛物线的切线即为当前的移动方向。

在较为真实的有遮挡环境（例如城市道路）中，由于建筑物及道路的存在，节点无法通过直线移动穿越障碍到达终点，便无法通过分析当前的移动方向与终点位置来预测节点移动路线。此时在APP中引入第三方导航来解决此问题。由于导航技术的迅速发展，用户采用各种交通方式的导航数据均可轻易获得，且精准度较高。通过导航在帮助用户规划路线的同时，可获得较为准确的用户移动趋势信息。

### 3.1.2缓存预置区域数量

缓存预置区域是本文所述机制的核心。采用多个区域的意义在于通过多区域的协作内容分发，提升请求节点获得数据的成功率与效率，同时减少缓存配置时的过缓存与欠缓存情况。每个缓存区域各承担一部分缓存任务，区域间缓存资源不相同，通过区域协作完成全部资源的数据传输。每个缓存区域的大小在同一网络环境中都是相同的，形状为圆形，大小根据网络中的节点密度来确定。通过分析每个区域的数据传输能力和某次请求资源的数据量大小可以确定该次请求所需的缓存预置区域数量，具体算法流程如下：

（1）当有节点请求数据时，根据其请求数据包大小m与D2D通信带宽B计算出该数据包所需传输总时间；

（2）根据网络中的节点密度p（每平方米中的节点数量）计算出圆形缓存预置区域半径（其中为一个区域内的期望节点数，具体视环境而定，默认为5）；

（3）根据圆形缓存预置区域半径r与请求节点移动速度vd计算出请求节点在区域内的最大停留时间。由于请求节点可能不是沿直径穿过区域，但大多数情况下停留时间不小于，因此取作为期望停留时间；

（4）根据传输总时间与期望停留时间计算出所需区域总数。根据总数据量计算出每个区域所需部署的缓存数据量，并将数据包按此数据量分块；

根据上述流程可确定某次请求所需的区域总数

其中在计算缓存区域的半径时，采取的思路是在每个区域中的期望移动节点数为5。当网络环境变化导致区域过大或过小时，可适当调节该数据，但在同一网络环境中，所有的缓存预置区域大小需保持一致。

计算请求节点在每个区域内的潜在期望停留时间，而不是直接用最大停留时间来进一步计算是因为请求节点在移动过程中具有随机性，在大致移动方向确定的情况下，由于障碍物阻挡等原因可能并不会完全按照预测路线行进。因此，当移动节点到达并穿越区域时，很可能不是由圆形缓存区域的直径穿越，如果按照直径来计算最大停留时间的话，会导致区域内欠缓存。因此在计算期望停留时间时，需引入一定量的冗余缓存，保证大多数情况下区域内不会欠缓存。在上述计算方法中，期望停留时间保证七成以上的穿越方式都可以获得足够的缓存资源，而实际上请求节点从越靠近圆心的割线穿越区域的概率越高，因此在绝大多数情况下都不会发生区域内欠缓存的情况。

### 3.1.3缓存区域潜在范围

在确定具体的缓存区域位置之前，首先要确定缓存区域的可选范围。具体来说，要确定缓存区域的潜在范围，只需找出在请求节点移动路线上，最早能接收到缓存位置，而由该位置到请求节点移动终点的路径上任意位置都可以设置缓存预置区域。要找出最早能接收到缓存的位置，而不是从请求节点发起请求的位置开始部署缓存区域是由于请求节点在不停地移动，而数据源节点与请求节点有一定距离。将缓存数据从数据源节点通过中继节点接力携带到缓存区域需要一定的时间，如果在请求节点发起请求时刻的位置设置缓存预置区域，则很大可能当缓存成功部署到区域内时，请求节点已经移动离开该区域且不会再次经过，此时该区域的缓存部署全部失败。因此，必须在请求节点的未来移动路径上找出一个位置，使得请求节点到达该位置时，数据源节点刚好能把缓存传输并部署到该位置的移动节点上。在该位置到请求节点移动终点的范围内，缓存能够在请求节点到达区域前部署到区域内，因此均可作为缓存区域的潜在规划位置。将该位置作为圆心的缓存预置区域记为“最快到达缓存区域”，在每次确定缓存预置区域位置时，都要先计算“最快到达缓存区域”的位置。

当网络中节点的移动近似于直线移动，且较少出现变更时，“最快到达缓存区域”的计算方法如下：

s

θ

l

v1t

v2t

d

dt

m

图3-1 直接计算最快到达缓存区域位置

由图3-1，在T0时刻请求节点d与数据源节点s之间距离为l。请求节点d有一近似直线传输方向，在t时刻后与最快到达的中继节点相遇，此相遇位置为dt。请求节点d有一平均速度v1，因此d与dt之间距离为v1t。请求节点s通过一次或多次中继节点携带数据，将数据包从s位置传输到dt位置。假设各中继节点m有相同的移动方向，均向dt直线移动，此时携带缓存的中继节点将会以最快的速度与请求节点相遇，因此dt是请求节点最早可以获得数据的地点。在dt之前的位置，请求节点不可能与带有缓存的中继节点相遇，在dt之后的位置均有可能相遇。ds与ddt之间夹角为θ，根据余弦定理

可解得，取t为正值。

由此可确定请求节点在t时刻后的潜在位置dt。以dt为圆心，请求节点连接范围为半径做圆，则该圆形区域为“最快到达缓存区域”。

当网络环境趋近于真实环境，节点预测移动路线中的转折次数较多，无法近似成直线移动时，可利用APP中接入的第三方导航来获取节点移动到某一位置时的预测时间，并利用二分法确定“最快到达缓存区域”的位置，具体方法如下：

根据请求节点预测路线和移动节点平均速度**ν**用二分法计算出最快到达缓存区域（最快到达缓存区域即离请求节点最近的缓存预置区域）的中心Dt。如图3-2，记请求节点当前位置为Dstart，移动终点为Dstop。通过基站查找数据源节点位置记为Ds。首先计算请求节点行进一半路程时的位置记为，从第三方APP获得从请求节点由Dstart到达此地的用时与数据源节点由Ds到达此地的用时，若请求节点到达的时间比数据源节点长，即>，则取到请求节点当前位置Dstart的中点为，否则取到请求节点移动终点Dstop的中点为Dt1。迭代上述步骤直至请求节点比数据源节点到某地的时间更长，且不多于30秒，即，则此时的即为最快到达缓存区域的中心Dt。

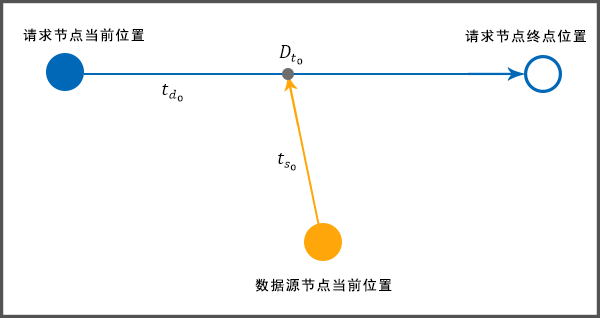


图3-2二分法计算最快到达缓存区域位置

两种不同网络环境下的缓存区域潜在范围数据获取方式不同，计算方法也不同，因此在计算精度上会有少许差别。第一种方法在节点移动路线确定的情况下，精确度更高，但是对移动模式要求较为苛刻；第二种方法计算的精确度较为依赖第三方导航的数据，因此在计算时取了较多的冗余，优先保证在请求节点到达区域前能把缓存资源部署到位。在本文后续的仿真实验环境中，由于节点移动模式更接近第一种情况，因此默认的缓存区域潜在选择范围算法采用第一种方式。

### 3.1.4确定全部缓存区域位置

在确定缓存预置区域的潜在选择范围后，需要根据缓存区域的数量以及请求节点到达预测路线上某一位置的概率高低来确定具体的缓存区域位置。

在确定缓存区域的位置时，必要条件是各缓存区域必须处于潜在选择范围之内，而进一步的选择依据则是请求节点到达该区域的概率更高、时间更快。由于D2D移动网络中的节点移动具有随机性，预测的行进路线并不完全准确，为了保证资源的顺利分发，需要优先选取请求节点到大概率高的位置来规划缓存预置区域。而在个位置到大概率相近，或根本无法获取请求节点到达概率时，选择请求节点更快到达的位置来规划缓存预置区域。

如今，大数据与人工智能的迅猛发展使得我们可以通过收集移动节点的移动行为来分析其每一次移动中，到达某一位置的概率。例如，通过记录某人每天上班的路线，可分析出其走每条路线，以及途中经过每个位置的概率。如果能够获得这种概率，我们就可以在他下一次上班途中请求数据时，根据到达每个位置的概率高低来确定缓存区域的位置。因此在大数据的支持下，确定缓存预置区域的方法如下：

将请求节点预测移动路线上位于潜在区域选择范围内的部分中选取n个点，每两个点之间间隔为缓存区域的直径2r；

根据请求节点到每个点的概率p将n个点由大到小排序，取第个（缓存预置区域数量）点的概率记为pa；

选取概率大于0.9 pa的点，并按照请求节点到达时间的先后顺序排序，选则前个点作为缓存预置区域的圆心。

按照上述方法可选择出请求节点移动路线上到达概率高且到达时间早的位置来规划缓存预置区域。

在在大多数没有大数据支持的情况，并不能轻易获得请求节点到达某一位置的概率，此时需要使用APP与用户交互，让其确认是否会经过某一区域，若确认则此区域得到达概率为100%。与此同时，更靠近确认区域的位置会有更高的到达概率，因此区域的部署采取首尾相接、紧密相联的方式。具体的方法为：

如图3-3，在计算出“最快到达缓存区域”后，在APP中显示其圆心位置，并由用户确认是否会经过该位置；

若用户确认会经过该位置，则将该区域确定为其中一个缓存预置区域，记为“第一缓存预置区域”；若用户不确定会经过此位置，则按如下方式由用户重新选择一个一定会经过的位置（若没有一定会经过的位置，则选择经过的概率较高的位置）：在请求节点预测路线上，“最快到达缓存区域”Dt到移动终点Dstop之间的范围内选择出一个距Dt最近的位置，作为“第一缓存区域”的圆心。

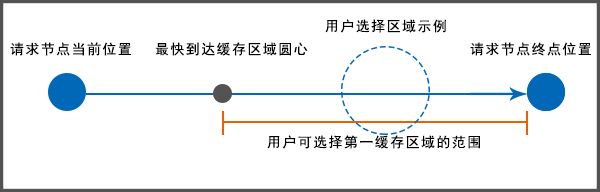


图3-3用户选择区域示例

在确定“第一缓存区域”位置之后，其余的缓存预置区域依次排列于第一缓存区域之后，在请求节点行进路线上首尾相接。

在上述方法中，只由用户确定一次必然经过的位置，而不是确定全部缓存区域位置是为了减少用户的操作。而且在用户确定经过“第一缓存区域”之后，短时间内改变移动方向的概率较低，因此到达其他缓存预置区域的概率均较大，且在某一区域发现请求节点移动偏离预计方向时，也可迅速修正后续缓存预置区域的位置，保证请求节点可以到达全部区域。

## 3.2理论计算及仿真实验

本章节中重要介绍了如何根据请求节点的移动趋势及请求数据包的数据量大小来确定缓存区域的数量及位置。因此，理论分析与实验共分为两组：（1）通过理论计算在相同网络环境下，多区域与单区域要使请求节点获得相同的期望传输时间，所需部署的缓存节点数；（2）通过仿真实验分析不根据请求节点移动趋势来确定缓存区域时，缓存部署的成功率。

### 3.2.1实验环境

本次仿真实验使用omnet++平台来搭建模拟系统。仿真实验在500\*500m的正方形区域内进行，区域正中有一基站，其余节点均为移动节点并随机分布在实验区域内。模拟系统中移动节点的移动方式遵循随机步行移动模型（RW：Random Walk Mobility Model）。实验中每次请求的数据源节点和请求节点均为随机选择，当一次请求的数据传输完成后再发起下一次请求。不同节点间的D2D数据传输速率保持不变。表3-1列出模拟实验的其他参数。

表3-1 模拟实验参数

|  |  |
| --- | --- |
| 参数 | 值 |
| 模拟区域 | 500m\*500m |
| 默认通信范围 | 150m |
| D2D通信带宽 | 1Mb/s |
| 数据包大小 | 10Mb |
| 默认节点移动速度 | 10m/s |
| 请求时刻间隔时间 | 6s |

### 3.2.2理论计算分析规划多缓存区域的必要性

表3-2 多区域与单区域所需缓存节点数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 所有区域的总期望传输时间（s） | 多区域所需缓存节点数（个） | 单区域所需缓存节点数（个） | 单区域与多区域缓存节点数之比 |
| 5 | 3 | 1 | 0.33 |
| 10 | 6 | 4 | 0.67 |
| 15 | 6 | 8 | 1.33 |
| 20 | 9 | 13 | 1.44 |
| 25 | 9 | 20 | 2.22 |
| 30 | 12 | 29 | 2.42 |
| 35 | 12 | 39 | 3.25 |
| 40 | 15 | 51 | 3.4 |

其中所有区域的总期望传输时间指的是请求节点要获取全部内容，需要在所有区域内接收数据的期望时间。多区域所需缓存节点数指的是利用文本所述的固定区域面积，增加区域个数的方法，完成总期望传输时间所需的缓存节点数。单区域所需缓存节点数指的是只设置一个缓存区域，根据数据包大小增加区域面积，完成总期望传输时间所需的缓存节点数。完成同样期望传输时间的任务，所需缓存节点数越少，则节点缓存空间的利用率越高。 计算方法如下：

所有区域的总期望传输时间:

多区域方案的区域个数:

多区域所需缓存节点数:

单区域所需缓存节点数:

单区域与多区域缓存节点数之比为：

其中=3，=10，=0.0002。

由表3-2中数据可以看出，随着期望传输时间的增大，也即数据包中数据量的增大，所需的区域内缓存节点数也随之增大。传输更大的数据包，需要将数据部署在更多的区域缓存节点中，由其协作完成数据分发。

在相同区域传输时间的条件下，当期望传输时间不大于10秒时，多区域所需的缓存节点数要大于单区域所需缓存节点数。这是由于，当数据包较小时，只需要将数据部署在一个较小的区域内即可完成数据的分发。此时，由于多区域的区域大小是固定的，在不到一个区域就能完成内容分发时，会造成一定的冗余。而单区域的区域大小随期望传输时间而变，在数据包较小时可以将区域范围随之缩小，节省缓存节点资源。因此，在所需传输的数据包较小时，单区域变面积比多区域固定面积更具优势。

在相同区域传输时间的条件下，当期望传输时间大小于15秒时，单区域所需缓存节点数均大于多区域所需缓存节点数。且随着期望传输时间的增加，两者的差距逐渐加大。原因是使用单区域部署缓存数据，需要随着数据包的变大不断增大缓存区域的面积，而请求节点的移动路径一般都为一条直线，圆形区域内的大部分缓存节点都无法与请求节点发起通信，因此会造成较大的浪费。而多区域部署缓存时，每个区域的面积有限，区域内的节点都有机会和请求节点发起通信，因此缓存节点利用率较高。

由于本文机制主要解决的是大数据包的内容分发问题，因此使用过多个面积固定的区域协作部署缓存数据效率较高。

### 3.2.3实验分析基于移动趋势确定区域位置的必要性

图3-4由请求节点发起请求时刻位置确定缓存区域时的缓存部署成功率

本章节中提到的确定缓存区域位置的方式是预测请求节点的移动趋势，在请求节点未来的移动路线上规划区域。预测请求节点移动趋势的意义在于，网络中传输数据需要一定的传输时间，而当请求节点移动速度较快时，当缓存部署到请求节点在请求时刻的位置时，请求节点早已远离该位置，导致缓存部署失败。为了验证该问题，本实验中将第一缓存区域位置的圆心设定为请求节点在请求时刻的位置，验证当数据部署到区域内时，请求节点是否仍在该区域内。

由图3-4，当网络中节点不移动时，数据部署成功率可达到100%。而当节点移动速度不断加快时，缓存在第一区域的部署成功率大幅下降，并在速度达到20m/s 后趋近于0。出现此结果是由于在请求数据包的平均中继传输时间不变的情况下，请求节点移动速度越快，离开区域的时间就越短，缓存部署的成功率也相应越低。与此同时，当D2D 通信范围增加时，缓存部署的成功率也会增大，这是由于通信范围的增加减少了在相同距离传输数据所需的跳数，加快了中继传输的速度，使得数据包可以更快地部署到缓存区域内。

上图中，不管D2D 通信范围如何变化，在节点移动速度达到10m/s 后，缓存部署的成功率都会低于70%，这远远达不到所需的可靠性要求，因此通过预测请求节点移动趋势来确定缓存区域位置是很有必要的。

## 3.3本章小结

本章研究了如何根据请求节点的移动趋势确定缓存区域的数量及位置。给出了预测节点移动趋势的方法、基于数据包大小确定区域数量的方法、利用移动趋势确定缓存区域位置的方法。通过理论计算及实验验证了移动趋势预测的必要性和使用多区域进行协作缓存的必要性。

# 第四章 缓存资源的分配与部署方法

## 4.1 问题概述

区域协作缓存算法的缓存预置区域确定之后，需要选择合适的中继节点携带缓存数据，将缓存资源从数据源节点处接力传输至缓存预置区域，并交付给区域内的移动节点保存缓存数据，直至请求节点到达缓存预置区域。在中继节点未到达缓存预置区域，即缓存区域内无数据时，需要选择何时数量的中继节点携带数据，在保证能将数据传输至缓存区域的同时尽量减少缓存数据的副本数与通信信道开销。而在中继节点到达缓存区域后，则需要将数据迅速分发给区域内的移动节点，并不断保持数据传输使得区域内的每个移动节点都缓存有数据。故在中继节点到达缓存预置前后需采用不同的方法来选择中继节点。同时，由于缓存区域不止一个，中继节点也有多个，需要将请求的数据包分块，并经过随机线性网络编码处理，防止某个中继节点移动偏离预定方向导致数据丢失而造成该次数据请求传输失败。

## 4.2基于区域协作的缓存资源分配方法

由于本文区域协作缓存机制中，缓存区域的数量很可能不止一个，因此需要给不同的区域分配不同的缓存数据，使得请求节点可以在每个不同的区域获得不同的数据，进而通过全部区域的协作内容分发获取到足够的数据。基本思路就是按照区域的数量，将原有数据包分为区域数量对应的块数，给每个区域都分配独有的缓存资源。如果用户请求的资源是流媒体，则需要按照时间序列将数据按顺序分配给离请求节点最近到最远的区域，此时用户可以经过一个区域就获得一部分数据，并可立即观看该部分视频。具体分配方法如下：

（1）判断请求节点与数据源节点的相对位置与移动趋势，如果两者位置很近，不仅已经处于D2D通信范围内，而且在断开连接前可以传输全部的数据，则无需对数据包进行处理，直接发送即可；

（2）判断缓存预置区域的数量，若区域个数仅为1个，则该资源数据量较小，无需对其进行分块处理，直接寻找中继节点发往缓存区域即可；

（3）若缓存预置区域的个数大于1，则将其分为区域个数对应的块数。其中，如果该数据包是流媒体资源，则对其按照时间序列的顺序进行分块，保证每一块数据都是可以连续的，可以直接观看其内容；

（4）在未分配的数据块中挑选时间序列最靠前的，分配给没有数据块任务的区域中离请求节点最近的区域；

（5）重复步骤（4），直至所有区域都分配好缓存数据任务。

按照上述步骤操作，可确保每个区域所承担的缓存部署任务都各不相同，减少数据的冗余。同时，按照时间序列的顺序分配缓存，可以使得用户每经过一个区域，就能接收并解码该区域的数据，直接浏览该部分的内容。在经过第一个区域后，请求节点即可实现边观看内容边接收数据。但是，如果仅仅给每个区域分配不同的数据资源，没有任何冗余，就会出现在移动趋势预测出现偏差时，因某个区域没有接收到足够的数据导致整次数据传输失败的情况。因此，为了提高区域缓存系统的可靠性，避免节点移动不符合预期导致的传输故障，需要在分配区域数据任务时，设置一定量的协作冗余数据。

## 4.3缓存中继传输与部署方法

在确定缓存区域的位置后，需要合适的中继传输方法将缓存资源由数据源节点处部署至缓存区域内。该中继传输过程可分为两个部分：在区域中没有缓存数据时，选择合适的中继节点携带数据，通过节点移动与 D2D 通信将缓存传输至缓存区域；在携带缓存的中继节点到达区域后，迅速寻找区域内的移动节点，并将数据交与这些节点，保持区域内有足够的缓存资源直至请求节点到达。由于移动可能会导致数据包丢失，引发优惠券收集问题，因此还需在中继传输前对数据包进行随机线性网络编码处理。

### 4.3.1随机线性网络编码

由于缓存预置区域可能有多个，且每个区域承担的缓存任务各不相同，因此在数据源节点将数据发送给对应区域的中继节点时，需要先对原数据包按区域总数进行分块。此时，每一个缓存区域对应一个数据分块，各个区域之间的中继传输是互相独立的。而当请求数据包较大时，将数据包按照缓存区域数目分块后的每个数据块可能仍然过大。由于D2D移动网络中节点移动频繁且通信范围受限，两个中继节点在传输一个较大的数据块时，可能会出现移动超出通信范围时仍未完成数据块传输的情况。因此，需要对较大的数据块进行进一步的分块，具体分块数目视请求数据量大小而定。

在将数据包分成若干小块后，即可利用多个中继节点协作，通过多条路由线路将数据块分别携带至预定的缓存区域。如果在中继节点传输数据前对数据包进行直接分块而不进行编码处理，在数据传输过程中可能会遇到中继节点移动偏离预定路线而丢失其所携带数据块的情况。此时，每个中继节点所携带的数据均可能是唯一的，任意的中继节点出现移动偏差都会导致整次数据传输失败，即会遇到著名的优惠券收集问题。对于优惠券收集问题，描述如下：假设将数据包分为s块，且每一块数据块都是唯一的，则不论数据传输过程中采用何种路由算法，是否对现有数据块进行复制，都要收集到全部的s种数据块才能还原出最初的数据包。在中继传输中每个数据块被收集到的概率相同的前提下，理论证明要恢复原数据包，需要收集的数据块数趋近于Θ(*s*log *s*)块，远大于数据包的分块数s块。因此，在保证数据传输可靠性的前提下，使用无编码的直接分块方式需要在数据传输时引入很大的数据冗余，才能完成全部数据分块的传输。

为了减少期望传输数据块的冗余量，需要在分块时对数据块进行网络编码处理。在综合考量各种网络编码算法后，本文选用线性随机网络编码对数据分块进行预处理。线性随机网络编码的基本思路是从伽罗华域中随机生成一组系数向量组，将该向量组与数据分块进行随机线性组合，即可得到编码后的数据块，具体算法流程如下：

（1）首先，数据源节点将原数据包P分成s块相同大小的数据块：P={p1， p2， · · · ， ps}；

（2）从伽罗华域（伽罗华域定义为以素数p为模的整数剩余类环构成的p阶有限域，加、减、乘、除法等四则运算在域内封闭）中随机生成一组系数向量组= (αj1， αj2， · · · ， αjs)，将该向量组与原数据块进行随机线性组合即可得到一组编码后的数据块：。编码后的每个数据块依旧拥有相同的数据量。

（3）和纠删码只能在数据源节点分块时进行编码处理不同，随机线性网络编码也可以在中继节点处进行再次编码。如果一个中继节点得到了s’个编码后的数据块，它可以继续从伽罗华域中生成一组系数向量= (βk1， βk2， · · · ， βks0)，并与现有的数据块进行随机线性组合，进而得到新的编码后数据块：

和数据源节点编码处理过的数据块相同，这一组新的中继节点编码后数据块也是原数据块的线性组合。只要在接收端收集到任意的s个编码后数据块即可解码复原出原数据包。因此，相比于不进行编码处理而需要收集Θ(*s*log *s*)块数据块，且有可能彻底丢失数据，使用随机线性网络编码对分块进行处理可以大大减少传输过程中的数据块冗余，提高终极传输过程的可靠性与效率，同时解决了某一数据块丢失会导致整次数据传输失败的问题。

### 4.3.2到达缓存区域前的中继节点选择方法

在确定缓存区域的位置后，数据源节点需要分别选择合适的中继节点分发数据，使其携带数据接力传输直至到达各自预定的缓存预置区域。各缓存区域之间的中继节点选择是相互独立的，但其中也可能会有某些中继节点参与两个或更多区域的传输任务。在仅观察一个区域的中继传输问题时，可以将问题看作在D2D移动网络环境下两个定点间的数据传输问题。数据传输的起点是一个携带数据的数据源节点，而终点则是确定的缓存预置区域，在传输发起时刻，起点和终点均可看作是固定的。针对D2D移动网络的数据传输问题，现有很多种解决方法，例如广播、机会路由等策略。但是由于本文所研究的D2D移动网络环境中，节点保持不间断移动且移动速度较快，因此需要合适的方案克服节点移动对数据传输带来的影响，并利用节点移动增强数据传输的效率。由于本文算法对节点的移动趋势有所分析，因此考虑利用节点移动趋势信息来选择中继节点，并利用节点移动将缓存数据携带向缓存预置区域，基本思路是：由数据源节点根据缓存预置区域的位置，选择移动方向接近缓存预置区域的移动节点作为中继节点携带缓存数据，并由携带数据的中继节点在一定时刻后继续寻找新的符合条件的中继节点，通过多节点协作接力将缓存数据携带至缓存预置区域内。在考虑多区域的数据传输时，首先独立的寻找每个区域的中继节点，若有某个中继节点需要承担多个区域的传输任务，则先判断其是否能够有足够的通信时间接收到足够的数据，如果可以则按照区域的先后顺序依次向其传输资源；如果不能，则后面的区域需要再次寻找新的中继节点。此种缓存传输策略有效利用了节点的移动，提升缓存传输速度的同时节省了D2D通信次数，具体的算法流程如下：

（1）数据源节点在收到请求信息后，搜索处于通信范围内的移动节点，将其列入潜在的中继节点组，询问其当前位置与移动终点信息；

（2）以第一个缓存预置区域为目标，挑选出k个（k的具体取值视网络环境而定）最佳的中继节点，选择规则如下：首先比较各移动节点的移动方向（移动节点当前位置与移动终点的连线方向），若移动方向穿过缓存预置区域的节点数量大于k个，则进一步比较各节点的当前位置，挑选距离缓存预置区域圆心最近的k个作为向该缓存区域携带数据的中继节点；若移动方向穿过缓存预置区域的节点数量不足k个，则在潜在中继节点组中挑选节点移动方向与节点当前位置到缓存区域圆心连线方向夹角最小的k个节点，作为向该缓存区域携带数据的中继节点；

（3）以下一个没有挑选中继节点的缓存预置区域为目标，重复步骤（2），选择出k个最佳的中继节点，直至所有缓存预置区域都将各自对应的中继节点选择完成；

（4）判断是否有中继节点承担两个以上区域的传输任务。若有，则计算该节点与数据源节点的潜在连接时间ts，全部数据块传输时间tp。若ts>tp则该中继节点在通信范围内可以接收多个区域的数据块；若ts<tp则该中继节点无法接收多区域的数据，进一步计算其可承担任务的最大区域数量，超出该数量的区域重新按照步骤（2）选择新的中继节点替换该节点；

（5）数据源节点将数据包平均分为na（区域的总数）块，每一区域负责向请求节点分发一块数据。在数据源节点向中继节点发送数据前，将每一块数据继续分为pn块（具体分块数视数据包的大小而定），并使用随机线性网络编码进行对分块进行预处理。

（6）数据源节点给每个中继节点发送编码后的数据块，若某中继节点同时负责多个区域的传输任务，则依次向其发送多个区域的数据块。若某中继节点自身所负责区域的传输任务完成后仍与数据源节点保持通信连接，则数据源节点继续向其发送前一区域的数据直至连接中断。

（7）网络中每**τ**秒为一次传输时刻，此时携带数据的中继节点判断自身是否有机会与请求节点相遇。判断依据为当前位置到终点的连线与自身移动方向夹角是否小于45度，若是则重复步骤（1）—（6）；否则删除自身缓存数据，不再继续作为中继节点；

其中ts的计算方法如下：

对数据源节点和中继节点的移动速度进行二维坐标系分解，得到两者移动速度的分量，数据源节点x轴方向移动速度，y轴方向移动速度，中继节点x轴方向移动速度，y轴方向移动速度。数据源节点坐标为xs，ys，中继节点坐标为xz，yz。当两节点距离大于通信半径r时，通信中断，此时满足：

由上式可解得ts。

tp的计算方法如下：

中继节点所需传输的数据量为mz，D2D通信带宽为B，则。

上述方法中，中继节点在每个传输时刻都会寻找新的中继节点复制缓存数据继续传输，这带来了一定的传输冗余。之所以在每次传输时刻都寻找多个新的中继节点而不是一个，是因为网络中节点的移动具有随机性，在移动终点确定的情况下，可能并不会按照预测的直线路径行进。而数据传输是有严格时效性的，若中继节点无法在请求节点到达前将缓存数据送达缓存预置区域，则该部分的数据传输将会失败。因此，在中继节点接力传输数据时，每隔一段时间就需判断一下各中继节点的移动方向是否有机会到达缓存预置区域，若方向偏差较大则不再作为终极节点继续传输数据。同时，在每个传输时刻寻找多个中继节点复制数据，防止某个中继节点移动偏离预期方向而导致数据丢失，同时提升数据传输效率。在不同网络条件下，可以选择不同的每条中继节点复制数k，使得在数据冗余最小的情况下得到最佳的传输效果。

### 4.3.3缓存区域内的缓存部署方法

在中继节点到达缓存预置区域前，传输中最重要的是要防止节点移动导致的数据丢失或传输延误。而在中继节点到达缓存预置区域后，需要考虑的问题就变成了如何把缓存资源在区域内部署好并保持到请求节点到达区域。基本情况可分为两种：第一个中继节点到达缓存预置区域，区域内尚无缓存资源的情况；缓存预置区域内已有缓存资源，需要保持数据的流动使得区域内时刻充满缓存资源。在第一种情况下，需要携带缓存的中继节点迅速将数据分发给区域内的移动节点，将缓存资源部署好。而第二种情况则需要根据区域内节点的移动情况，将移动出区域的中继节点所携带的数据删除，并给新进入区域的节点部署缓存，保持区域内的全部节点均携带缓存数据。具体的缓存部署方法如下：

（1）当某传输时刻，某中继节点在判断自身位置时发现已到达预定的缓存预置区域，则其不再执行缓存区域前的中继节点选择步骤；

（2）到达区域的中继节点立即搜索处于自身通信范围和缓存预置区域交集内的节点，将其列入区域缓存节点组，并将指定的数据卸载下来交给该组节点。

（3）若该中继节点除本区域数据外，还携带有前一缓存区域的数据，且本区域数据发送完成后仍与区域缓存节点保持通信连接，则中继节点继续向处于连接状态的区域缓存节点发送前一区域的数据。

（4）区域缓存节点在接收到数据后，重复步骤（2）、（3），进一步寻找新的区域缓存节点，并分发指定数据，直到无法找到新的区域缓存节点。

（5）在每个传输时刻，区域缓存节点也执行步骤（2）、（3），寻找新的区域缓存节点并分发指定数据。在数据分发结束后判断自身位置是否仍处于缓存预置区域内，若仍在区域内则保留缓存数据；若已不在区域内，则删除所携带的缓存数据，不再作为区域缓存节点；

（6）在向区域缓存节点分发数据时，若某无缓存数据的区域缓存节点同时收到了多个数据分发请求，则选择更靠近缓存与之区域中心的节点向其传输数据。

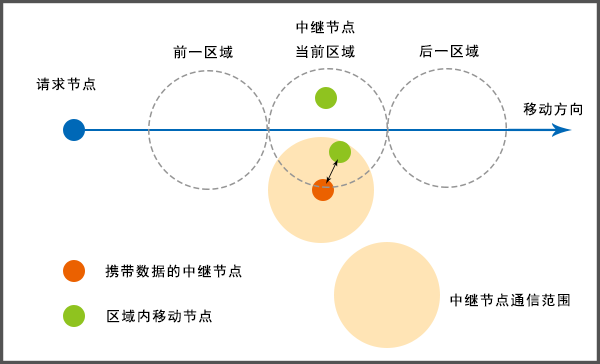


图4-1缓存区域示例

上述区域内中继节点选择方法中，将区域内的中继节点记为区域缓存节点。区域缓存节点的任务与中继节点有所不同，不仅仅担负着将缓存资源继续分发给区域内其他移动节点的任务，同时更重要的是存储资源并保证区域内的缓存资源充足，直至请求节点到达区域并获取缓存资源。

在上述算法中，有两种情况都会触发寻找新的区域缓存节点。第一种情况是在某区域缓存节点刚接收到缓存数据的时刻，该情况多发生在区域内尚未部署好缓存资源之时，需要区域内的节点不间断地存储、转发数据，迅速将数据扩散至整个缓存区域。第二种情况则是发生在和区域前中继节点选择算法中一样的传输时刻。该机制主要为了应对区域内已充满缓存资源，数据流动较少的情况。每隔一段时间检查缓存区域内是否有新的节点加入，同时原有的区域缓存节点是否已离开区域，保证区域内的资源不会因节点移动而逐渐消散。

在区域内部署缓存资源时，选择将全部区域内的移动节点都列为区域缓存节点是由于缓存区域的大小已根据网络中节点的密度确定好，区域内的期望节点数保证能够满足向请求节点的数据传输要求，而又不至于引入过多的冗余。因此，需要时刻保持区域内的所有移动节点都携带有指定的缓存数据。

## 4.4仿真实验

本章节主要介绍了如何选择中继节点来将数据包从数据源节点传输至缓存区域。在每一个传输时刻，携带数据的中继节点都需要寻找 n 个下一跳中继节点继续传输。此时选择不同的 n，将会影响整个中继传输过程的传输成功率与资源利用率。为了分析每次传输过程中的节点资源的利用率，定义成功传输代价为每一次传输成功所需的缓存节点数。本次实验通过对比不同的 n 的取值对应的成功传输代价和传输失败率，得出当前网络环境下最佳的每跳选择中继节点数。同时与广播的方式对比，确定本算法在资源利用率方面的优势。

### 4.4.1实验环境

本次仿真实验使用omnet++平台来搭建模拟系统。仿真实验在500\*500m的正方形区域内进行，区域正中有一基站，其余节点均为移动节点并随机分布在实验区域内。模拟系统中移动节点的移动方式遵循随机步行移动模型（RW：Random Walk Mobility Model）。实验中每次请求的数据源节点和请求节点均为随机选择，当一次请求的数据传输完成后再发起下一次请求。不同节点间的D2D数据传输速率保持不变。表4-1列出模拟实验的其他参数。

表4-1 模拟实验参数

|  |  |
| --- | --- |
| 参数 | 值 |
| 模拟区域 | 500m\*500m |
| 默认通信范围 | 150m |
| D2D通信带宽 | 1Mb/s |
| 数据包大小 | 10Mb |
| 默认节点移动速度 | 10m/s |
| 请求时刻间隔时间 | 6s |

### 4.4.2实验结果及分析

图4-2每跳选择不同中继节点数的成功传输代价

图4-3每跳选择不同中继节点数的传输失败率

由图4-2可知：当每跳选择的中继节点数增加时，成功传输代价也随之增加。其中，每跳选择1或2个中继节点时，成功传输代价均小于15，且数值较为接近。而在每跳都把数据分发给全部通信范围内的中继节点，即使用广播方式寻找中继节点时，成功传输代价远远是有数量限制时的2倍以上。而机会路由机制在选择中继节点时，就是利用广播的方式。因此，本章节所述的中继节点选择方法较机会路由策略在资源利用率方面有较大优势。

由图4-3可知：随着每一跳选择的中继节点数增加，传输失败率也相应降低。但是，在每一跳选择中继节点数大于1时，传输的失败率均接近10%，处于可接受范围。而每跳如果只选择一个中继节点，传输的失败率达到选择两个以上节点数时失败率的2倍。这是由于只选择一个中继节点，当此节点传输失败时，将会直接导致丢失数据，使得整次中继传输失败。而在每跳选择两个及以上中继节点时，即使有一个中继节点传输失败，也还有其他的节点携带相同的数据可以完成传输任务，因此可靠性较高。

综合两图数据可以看出，在当前的网络环境下，每一跳选择两个中继节点既可以保证传输失败率在可接受范围，又能够最大限度的减少成功传输代价，性价比最高。每一跳选择1个中继节点，虽然成功传输的代价最低，所需的节点和信道资源最少，但是传输失败率过高，不可接受。而采用广播的方式来寻找中继节点，拥有最低的传输失败率，但是比选择两个中继节点的情况并没有明显的优势。同时，采用广播的方式来寻找中继节点时，成功传输代价过高，节点资源浪费过于严重。

## 4.5本章小结

本章研究了将缓存资源从数据源节点部署至缓存区域时的中继节点选择方法，主要包括：缓存数据到达区域前的中继节点选择方法和缓存区域内的缓存数据扩散方法。通过实验验证了本机制相比机会路由寻找中继节点的广播方法在成功传输代价方面有较大优势。在允许的传输成功率范围内，成功传输代价最低的每跳选择中继节点数为该网络环境下的最佳选择。

# 第五章 基于区域协作的内容分发与区域位置修正方法

## 5.1问题概述

缓存区域的协作机制是本文区域协作缓存的核心特点。由于D2D移动无线网络的网络环境与pc互联网及蜂窝网络不同，网络中的节点时刻处于高速的随机移动中，而D2D通信范围相比基站的通信范围又十分有限，因此缓存的部署位置需要根据请求节点的移动情况来动态规划。本文采用预测请求节点移动趋势，并在其移动路线上规划多个缓存区域的方式来确定缓存的部署位置，可以有效的修正节点移动给传输带来的误差。但是由于在真实的网络环境中，移动节点的移动路线不会完全吻合预定路线，事故或拥堵等随机事件都会导致移动节点更改预期路线。在用户临时更改路线导致预测出现偏差时，就可能会导致某个或者某些区域的缓存资源无法顺利传递给请求节点。因此，需要各区域通过协作来提升整个系统的可靠性。

前文中主要阐述了如何确定缓存区域位置和如何部署缓存资源，但没有对请求节点到达区域后的内容分发问题进行详细的分析。同时，在请求节点移动趋势预测出现问题时，如何修正缓存区域的位置，重新部署缓存资源，也是本章讨论的重点。

## 5.2基于区域协作的缓存内容分发方法

在区域协作缓存机制中，总的内容分发流程可以分为两个阶段。第一个阶段是缓存部署阶段，即通过请求节点移动趋势规划缓存预置区域的位置，寻找中继节点将缓存资源携带到缓存预置区域中，并通过区域内节点间协作通信完成缓存资源的部署。在第一个阶段中，每个区域都应该在请求节点到达区域之前部署好既定的缓存资源。而当请求节点移动到达第一个缓存预置区域时，整次数据请求将进入第二个阶段，即区域协作内容分发阶段。在此阶段中，请求节点将会按照预测的移动路线依次穿过所有的缓存预置区域。请求节点经过每个区域时，都会获得一部分缓存资源，通过多区域协作内容分发获得全部的资源。

在上一节中，已分配好每个区域所承担的内容分发数据量。但由于请求节点的移动有可能会出现偏差，导致某些区域不能完成既定的任务。因此，在内容分发时，需要各区域之间进行协作，来避免请求节点实际移动路线与预测路线出现偏差而导致不能获取到足够的数据。基本思路是：各区域之间互帮互助，若某个区域中缓存节点与请求节点的通信时间不足以完成该区域的既定任务，则由与其相邻的区域完成剩余数据的分发。具体方法如下：

（1）为每个区域设定缓存部署任务时，除各不相同的既定任务外，增设前向协作任务，内容为所述区域前一区域的数据，具体数据量视网络情况而定（若请求节点移动方向改变的几率较大，则设置较多的前向协作任务；若请求节点移动方向改变几率较小，则设定较少的前向协作任务）；

（2）在中继传输过程中，带有缓存数据的节点先将既定任务的缓存数据传输给下一跳的中继节点，完成后再传输前向协作任务的缓存数据；

（3）在相邻两区域既定任务缓存数据都部署好，而请求节点尚未到达时，由后一区域的区域缓存节点将数据块传输给前一区域的区域缓存节点。此部分数据为后向协作缓存数据，由于两相邻区域是紧密相联的，因此必然会有两不同区域的区域缓存节点处于通信范围内，可以在请求节点到达前在两区域间持续传输数据，最多不超过后一区域既定任务的1/3（区域范围有限，部署过多的缓存数据也无法都分发给请求节点）；

（4）在请求节点到达某个缓存预置区域后，首先判断其是否得到了足够的前一区域既定任务缓存数据。若已缓存足够前一区域数据，则本区域内缓存节点直接向其分发本区域既定任务的数据；若前一区域数据有缺漏，则本区域内缓存节点先向请求节点分发前向协作缓存数据，待前一缓存区域的既定任务完成后再分发本区域既定任务缓存数据；

（5）若请求节点在某区域时，本区域的既定任务已经完成，则由本区域内的区域缓存节点继续向请求节点分发后向协作缓存数据，直至请求节点离开该区域；

（6）重复步骤（4）、（5），直至请求节点经过所有缓存区域，若收集到足够数据则传输完成。

在请求节点到达某区域后，区域内可能有多个缓存节点都与请求节点处于通信范围，而请求节点只能与一个节点发起通信，接收数据。此时选择离请求节点最近的一个区域缓存节点，由所述缓存节点向请求节点发送数据。在所述区域缓存节点与请求节点通信中断后，继续寻找离请求节点最近的区域缓存节点发起通信，直至请求节点离开该区域。

## 5.3区域位置修正机制

### 5.3.1内容分发过程中的区域位置修正机制

上述讨论的情况是请求节点移动路线稍有偏差，依然会经过所有的区域，但某些区域的缓存分发任务可能无法完成。而如果请求节点的实际移动路线与预测路线出现了较大的偏差，导致许多区域根本不会经过，则通过相邻区域协作分发数据也无法完成数据传输请求。此时，需要根据请求节点的移动趋势变化，来实时调整缓存预置区域的位置。首先，要获得最新的请求节点移动趋势数据，并修正有问题的移动路线。由于在请求节点发起请求时，就在APP上确认会经过第一缓存预置区域，因此可在请求节点到达第一缓存预置区域时获取其当前移动方向、移动速度、进入缓存区域时的位置等信息，并借此重新计算其移动趋势路线。若在此时发现请求节点的当前移动趋势与预测移动路线有较大偏差，会导致有区域无法经过，则需立即修正无法完成传输任务的区域的位置，并重新部署缓存资源。而请求节点也有可能在经过按原定路线某些区域后，因外力突然改变移动方向，而导致后续的缓存预置区域无法到达。由于常规情况下，缓存预置区域是紧密相连的，因此请求再点在中途发生移动方向改变时会处于缓存预置区域内，易得到其移动方向信息。当请求节点在某个缓存预置区域内移动方向突然大幅改变时，立即重新预测其未来移动路线，并修正缓存预置区域位置。

具体的区域位置修正步骤如下：

（1）当请求节点到达第一缓存预置区域时，获取其当前位置、移动方向等信息，重新计算其当前移动趋势并与请求时刻的移动趋势对比。若当前的请求节点未来移动路径依然会穿过全部的缓存区域，且在每个区域中的停留时间不小于期望停留时间的一半，则请求节点的移动趋势偏差在允许范围内，保持原有缓存区域位置不变；若请求节点的移动趋势偏差超出允许范围，则重新按照请求节点当前移动趋势计算除第一缓存区域外的缓存预置区域的修正位置；

（2）若请求节点在某个缓存预置区域内改变移动方向超过10度，则重新计算其当前移动趋势，并判断移动趋势偏差是否在允许范围内。若偏差在允许范围内，则保持原有缓存区域位置不变；若偏差超出允许范围，则重新按照请求节点当前移动趋势计算未经过的缓存预置区域的修正位置；

（3）若因请求节点移动趋势变化而重新计算了某缓存区域的修正位置，则立即寻找是否有同时处于初始缓存区域和修正缓存区域的缓存节点，若有，则由其向修正区域内的移动节点广播分发数据；

（4）若没有同时处于初始缓存区域和修正缓存区域的缓存节点，则查看所有初始区域缓存节点的通信范围内的节点，在其中寻找处于修正区域内的移动节点。若有，则通过该对节点将缓存数据传输至修正区域；

（5）若初始区域和修正区域间没有能够直接进行通信的节点对，则在初始区域中选取一离修正区域中心距离最近的缓存节点作为数据源节点，使用第四章中描述的中继节点选择算法寻找中继节点，将缓存数据部署到修正区域中；

（6）在某区域位置修正后，保留初始缓存区域内部署的数据，不可被删除或替换。待请求节点通过该区域的修正区域后，同时将初始区域和修正区域内的缓存数据设置为可删除状态。

（7）当请求节点通过全部区域后，收取到了足够解码的缓存数据，则此次请求的内容分发成功；若没有收集到足够的数据，则在请求节点移动终点处重新规划一个缓存预置区域，记为终点缓存预置区域，并寻找离此区域最近的数据源，重复第四章所述的中继节点选择方法，将数据部署到所述区域内。当请求节点到达移动终点时，即可接收到缺少的数据，完成此次请求的内容分发。

（8）上述步骤（6）中，在某区域位置修正后依然要保留初始区域内的数据不可删除，直到请求节点经过所属区域的修正区域，是由于请求节点大幅改变移动方向可能是由于事故或拥堵等外力作用，需要进行绕路。而在改变移动路线绕过问题路段后，请求节点可能会再次回到最初的移动路线上。此时，缓存预置区域可能会进行两次或更多次的修正，而某些经过多次修正的缓存区域位置和初始位置没有差别。因此需要保留初始缓存区域内部署的数据，在遇到前述问题时，可以减少中继通信次数，并保证区域内的缓存数据量充足。

在本文所述区域缓存机制中，缓存的部署是基于请求的。而自动的缓存替换算法可以根据具体的网络情况而选择，默认为最近最少使用算法（Least-Recently-Used，LRU）。在上述步骤（6）中提到的可删除状态即为该缓存资源可以被自动替换，或被用户主动删除。相应不可删除状态中，缓存资源不可以被替换或删除。在中继传输过程中，中继节点在判断自身无法与请求节点相遇后，即可将本次携带的缓存数据设定为可删除状态，可以被替换或删除。而缓存预置区域内的缓存节点，不论是初始区域还是修正区域，在请求节点通过前，区域内部署的缓存数据都不可被替换或删除。在请求节点通过某初始区域或对应的修正区域后，才可以将区域内部署的缓存数据设置为可删除状态。

### 5.3.2内容分发失败时的终点区域规划方法

当请求节点在经过所有缓存预置区域后，仍没有获取到足够的数据，此时在其移动终点附近重新规划一个缓存预置区域，并将缺少的数据部署到该区域内。由于不管请求节点移动路线如何变化，也一定会到达移动的终点，因此在终点处设置缓存预置区域可以保证请求节点一定能够得到次区域内的数据，进而完成请求。具体终点缓存预置区域选取步骤如下：

（1）当请求节点通过全部区域后，判断其是否收取到了足够解码的缓存数据。若收集到足够的数据，则此次请求的内容分发成功；若没有收集到足够的数据，则在请求节点移动终点处重新规划一个缓存预置区域，记为终点缓存预置区域；

（2）寻找离终点缓存预置区域最近的携带全部缺少数据缓存的节点，将其记为终点数据源节点；

（3）由终点数据源节点使用第四章所述的中继节点选择方法选择中继节点，将数据部署至终点缓存预置区域；

（4）在请求节点到达终点缓存预置区域后，接收缺少的数据块，完成此次请求的内容分发。

虽然在终点处设置缓存区域相比重新根据请求节点移动趋势在其移动路线上规划区域可能会牺牲一定的总请求时间，但避免了再次修正缓存区域的可能性，保证了系统的可靠性，并可能会减少中继传输代价。

## 5.4仿真实验

实验内容为：将本文所述的区域协作缓存机制与 GeRaF 机制在不同的网络情况下进行对比，评价标准为限时传输成功率。GeRaF 是 D2D 内容分发领域较为成熟的一种机会路由机制，他在中继传输方面与本文算法有所相似。限时传输成功率的定义为传输时间小于某一阈值的请求次数与总请求次数的比值。由于 D2D 网络中，节点不断移动导致在不限制时间范围的情况下，数据源节点总有机会与请求节点相遇，完成传输，因此不能直接对比传输成功率，需要对传输时间做一定的限制。

### 5.4.1实验环境

本次仿真实验使用omnet++平台来搭建模拟系统。仿真实验在500\*500m的正方形区域内进行，区域正中有一基站，其余节点均为移动节点并随机分布在实验区域内。模拟系统中移动节点的移动方式遵循随机步行移动模型（RW：Random Walk Mobility Model）。实验中每次请求的数据源节点和请求节点均为随机选择，当一次请求的数据传输完成后再发起下一次请求。不同节点间的D2D数据传输速率保持不变。表5-1列出模拟实验的其他参数。

表5-1 模拟实验参数

|  |  |
| --- | --- |
| 参数 | 值 |
| 模拟区域 | 500m\*500m |
| 默认通信范围 | 150m |
| D2D通信带宽 | 1Mb/s |
| 数据包大小 | 10Mb |
| 默认节点移动速度 | 10m/s |
| 请求时刻间隔时间 | 6s |

### 5.4.2实验结果与分析

图5-1限时传输成功率与节点移动速度的关系

图5-2限时传输成功率与D2D通信范围的关系

图5-3限时传输成功率与节点密度的关系

图5-1对比了在不同节点移动速度的情况下，本文机制与 GeRaF 机制的限时传输成功率。由图中数据可知：在节点不移动时，两种算法的限时传输成功率相近；而在节点移动的情况下，不论速度如何变化，本文机制的限时传输成功率均大于GeRaF 机制。同时，本文机制的限时传输成功率在移动速度增加时，有少许提升，且均保持在80%以上。而 GeRaF 的限时传输成功率则随着移动速度的增加而不断下降。得到该数据可能的原因是：（1）本文机制在确定缓存区域位置时，考虑了请求节点的移动情况，减少了节点移动带来的额外传输路程；而 GeRaF 机制在选择路由时，没有考虑请求节点的移动情况，因此会付出额外的传输代价。（2）在中继传输过程中，本文机制考虑了中继节点的移动的移动方向，利用节点移动携带数据减少了部分传输跳数；GeRaF 算法则是在中继节点收到数据后立即转发，没有合理利用节点的移动。（3）本文机制合理的分区和分块策略，使得中继传输的可靠性与效率更高，某个节点的数据丢失对于整个传输过程没有较大影响；GeRaF 算法在每一跳都只选取一个最佳的中继节点，若这个中继节点随后的移动方向与请求节点方向相反，则会影响传输的效率。若这个中继节点周围没有能够接收全部资源的节点，则会直接导致传输失败。

图5-2对比了在不同D2D通信范围下，本文机制与 GeRaF 机制的限时传输成功率。由图中数据可知：随着通信范围的增大，两种机制的限时传输成功率都随之增大。而本文机制在不同通信范围的情况下，限时传输成功率均大于 GeRaF 机制，并在超过90%后居于平稳。导致该实验结果的原因为：（1）本文机制利用缓存技术存储数据，当连接中断时依旧保留有部分数据；而GeRaF算法则采用广播传输数据，若连接中断则传输失败。本文机制受此影响更小，因而限时传输成功率始终高于GeRaF算法。（2）当通D2D信范围增大时，同一个节点可能连接更多的节点，两种算法寻找中继节点时均有更多选择，因此限时传输成功率随着D2D通信范围的增大而增大。（3）当通信范围达到一定阈值时，通信范围内的可选择的优质节点达到了每跳选择节点数的上限，因此当通信范围超过175米时，本文机制的限时传输成功率趋于稳定。

图5-3对比了在不同节点密度下，本文机制与 GeRaF 机制的限时传输成功率。由图中数据可知：随着节点密度的增大，两种机制的显示传输成功率都有所提高，但本文区域协作缓存机制的限时传输成功率始终高于GeRaF机制。同时，在节点数达到30后，两种机制的限时传输成功率均趋于平稳。导致该实验结果的原因是：（1）本文机制采用缓存存储数据，并利用节点移动来携带数据，相比GeRaF机制有更高的中继传输效率，因此限时传输成功率较高。（2）当节点密度达到一定阈值后，通信范围内的可选择的优质节点达到了每跳选择节点数的上限，因此限时成功率的增长趋于平稳。

结合三图可以看出：不论节点密度、移动速度、通信范围如何变化，本文机制对GeRaF机制均有一定优势。而且在节点移动速度更快时，本文机制的优势也更大。因此，本文机制更适合应用于网络中节点移动速度较快的D2D网络。

## 5.5本章小结

本章研究了区域协作缓存机制中的区域协作机制，包括如何通过区域协作分配缓存数据、如何由各区域协作向请求节点分发缓存数据、如何在请求节点移动趋势与预测不符时修正区域位置。结合前两章内容建立了系统模型，并进行了仿真实验。仿真实验结果表明，本文区域协作缓存机制可有效提升移动D2D网络环境下的内容分发效率。

# 第六章 总结与展望

随着移动通信技术的不断发展，D2D通信技术受到了越来越多的关注。由于移动 D2D 网络具有节点移动频繁、通信范围受限的特点，传统的路由与缓存机制无法保证移动 D2D 网络内容分发的效率与可靠性。因此，需要针对移动 D2D 网络特点设计新的内容分发机制。

本文介绍了移动蜂窝通信技术和D2D 通信技术的相关概念，对移动 D2D 网络中的内容分发问题进行了阐述，并总结了针对该问题的研究现状。结合现有思路，提出了基于区域协作缓存的 D2D 内容分发机制，解决了在缓存资源的分配与分发过程中的三大关键问题，并建立仿真平台对所述机制进行了性能分析。

论文的主要工作有：

总结现有针对移动 D2D 网络内容分发问题的方法与思路，提出了基于区域协作缓存的解决方案。

研究了如何确定缓存预置区域。根据请求节点的移动趋势与请求数据包的大小确定本次请求缓存区域的具体数量及位置，防止节点移动造成缓存部署失败并尽量节省节点缓存空间。

研究了如何确定携带缓存的中继节点。在缓存预置区域确定之后，每隔一个固定时隙，缓存节点依据移动趋势与地理位置在通信范围内的节点中选出 n 个最佳的移动节点作为中继节点，通过合理利用节点移动减少传输跳数与缓存副本数。

研究了如何利用多区域协作来完成缓存内容分发。多个缓存区域各自负责一部分缓存数据的存储与转发。每个区域也存储其他区域的资源，并通过多区域协作弥补可能出现在中继传输过程中的数据丢失问题。

论文的可行改进方向：

由于研究时间和水平所限，本课题研究还有很大的改进空间。第一，可以考虑增加蜂窝通信与 D2D通信协作的通信方式，提升内容分发的效率。第二，可以增加合理的缓存替换机制，优化网络中缓存资源的分配。第三，本文仿真中所涉及的移动模型较为简单，对于真实的用户移动场景没有研究。