



摘要

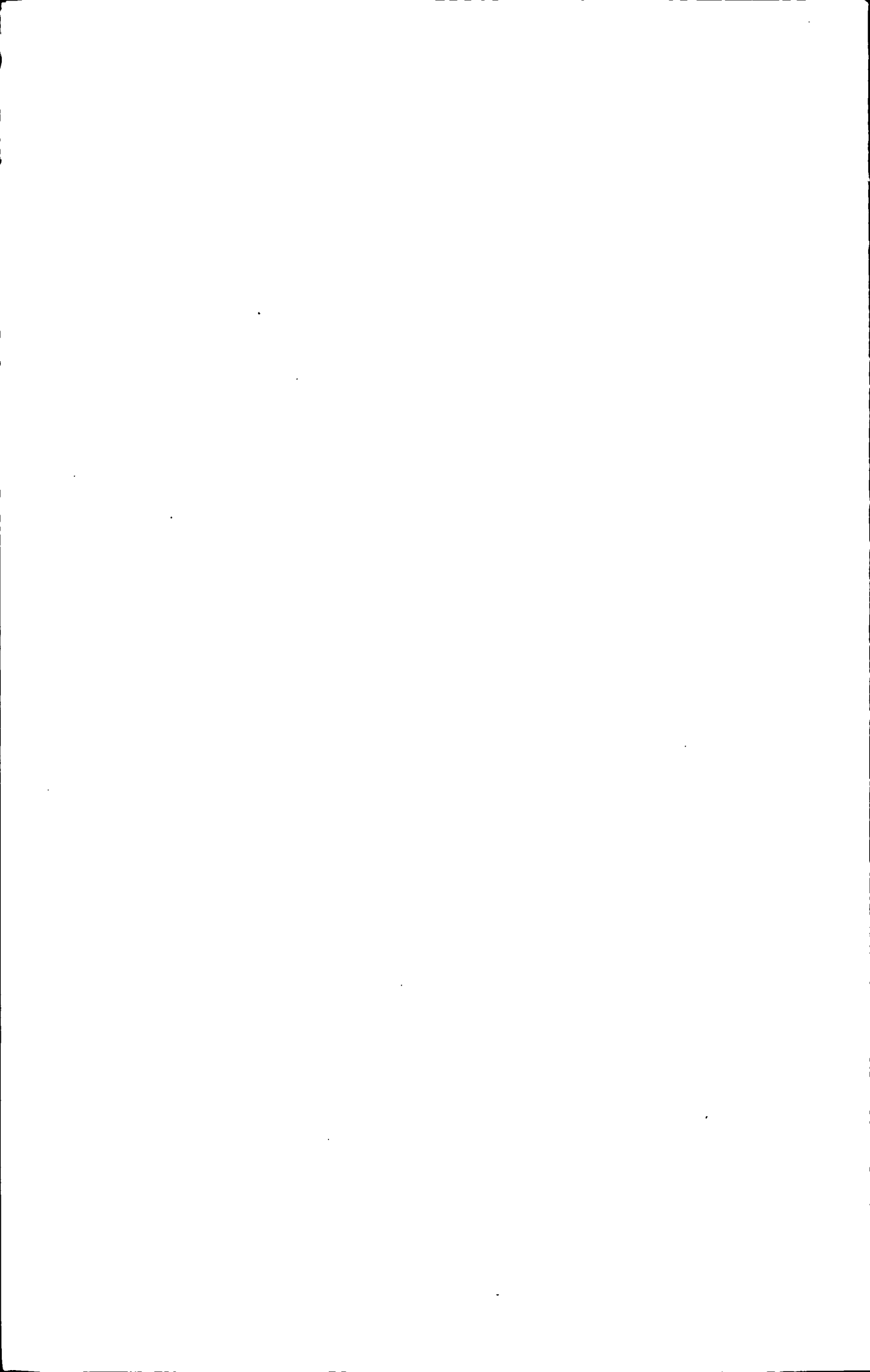


随着无线移动通信的快速发展,新的技术或方法不断被提出,用以满足日益增长的用户需求。无线 Mesh 网络技术是一种能够让移动终端之间直接建立通信链路的技术。协作通信技术是一种依靠节点间相互辅助来完成信息传输的技术。协作中继博弈是一种有效的资源分配方法。

本文首先介绍了 PMP/Mesh 混合网络结构模型,提出了一种基于协作的 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 的帧结构。其次,用 Matlab 仿真了基于协作的 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 的吞吐量以及容量等性能,结果表明,其性能得到了提高。

最后,将协作中继博弈的方案引入到 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 中,协作中继博弈的方案在中继节点和用户之间的应用实现了对中继节点的带宽资源的分配。仿真表明,从提高网络性能的角度来看,基于协作中继博弈方案优于传统的方案。

关键字: Mesh 协作通信 中继博弈 WiMAX



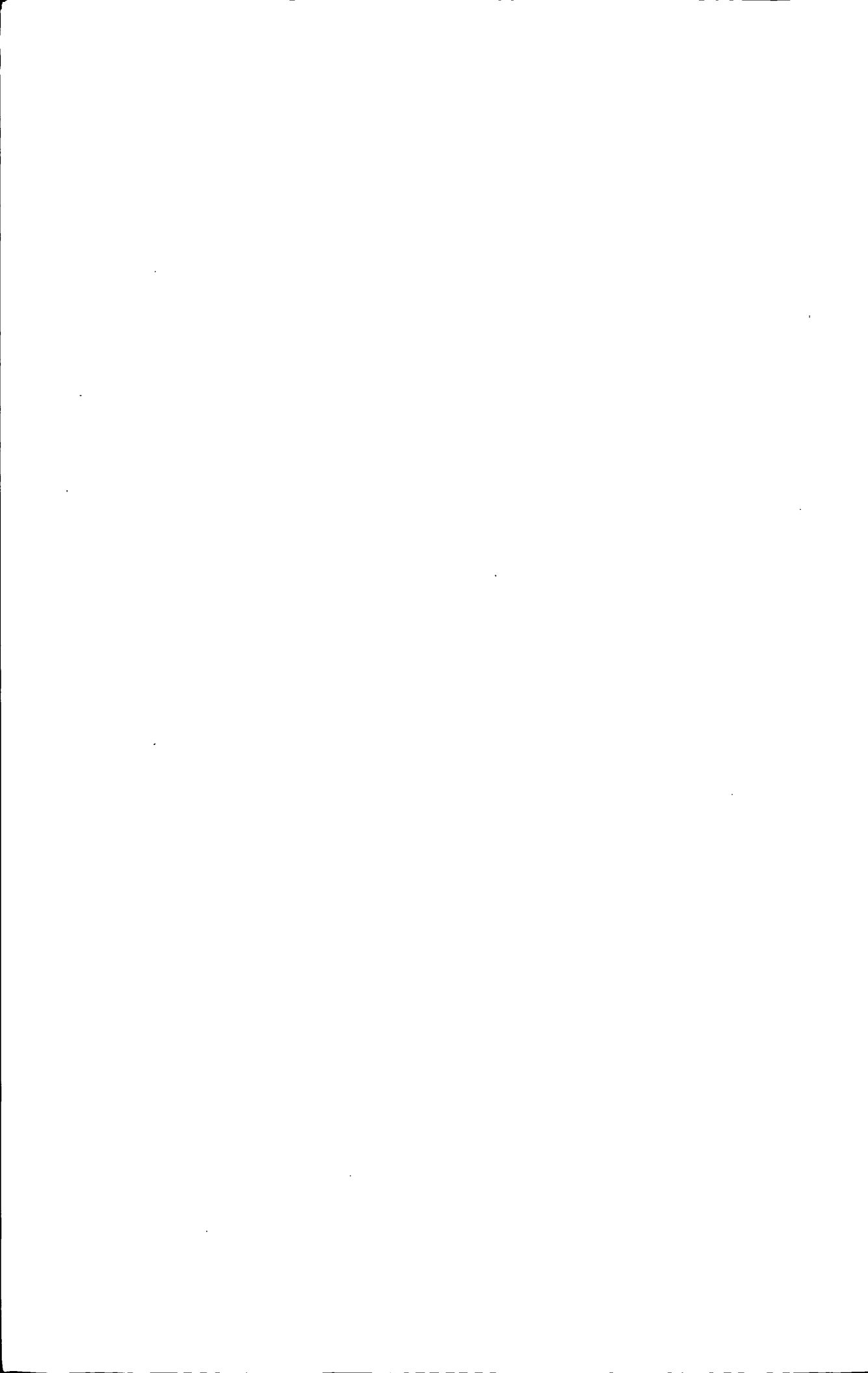
Abstract

With the rapid development of wireless communication, many new technologies and methods are being constantly proposed to meet the increasing requirements. The clients in Wireless Mesh Networks could establish direct links among them. By cooperative technique, the clients transfer data packets by means of the inter-assistance of their partners. Cooperative relay game is an effective resource allocation method.

Firstly, PMP/Mesh hybrid network structure is discussed, and the frame structure of the cooperation-based PMP/Mesh WiMAX is proposed in this paper. We simulate the performance of cooperation-based PMP/Mesh WiMAX using Matlab. Simulation results show that it performs better than others.

Finally, we lead cooperative relay game into PMP/Mesh WiMAX, cooperative relay game is used for relay resource allocation between relay nodes and clients. Simulation results show that cooperative relay gamemethod performs better than traditional methods.

Keywords: Mesh Cooperative communication Relay game WiMAX



目录

第一章 绪论	1
1.1 论文研究背景.....	1
1.2 无线 Mesh 网络.....	2
1.3 协作通信.....	2
1.4 协作中继博弈.....	3
1.5 本文的研究内容及章节安排.....	3
第二章 无线 Mesh 网络	5
2.1 无线 Mesh 网络.....	5
2.2 无线 Mesh 网络结构类型.....	6
2.2.1 骨干网 Mesh 结构.....	7
2.2.2 客户端 Mesh 结构.....	7
2.2.3 混合组网结构.....	7
2.3 无线 Mesh 网络的特征.....	8
2.3.1 可靠性强.....	8
2.3.2 覆盖范围大.....	9
2.3.3 可扩展性强.....	9
2.3.4 频谱效率高.....	9
2.3.5 简化链路设计.....	9
2.4 IEEE 802.16 的 Mesh 模式.....	10
2.4.1 Mesh 模式.....	10
2.4.2 Mesh 模式帧结构.....	11
2.4.3 Mesh 模式的新节点的接入机制.....	13
2.5 无线 Mesh 网络的应用及研究现状.....	14
2.5.1 无线 Mesh 网络的应用.....	14
2.5.2 无线 Mesh 网络的研究现状.....	14
2.6 本章小结.....	15
第三章 协作通信	17
3.1 协作通信技术的发展.....	17
3.2 协作通信方式.....	18
3.2.1 两用户协作通信.....	18
3.2.2 多用户协作通信.....	19
3.3 中继模型的分类.....	20

3.3.1 单中继双跳中继模型.....	20
3.3.2 单中继双跳协作模型.....	21
3.3.3 多中继并行协作模型.....	21
3.3.4 多中继多跳中继模型.....	22
3.3.5 多中继并行协作模型.....	23
3.4 分组空时编码在协作通信中的应用.....	25
3.5 本章小结.....	28
第四章 基于协作的 PMP/Mesh 混合网络结构的 WiMAX.....	29
4.1 PMP/Mesh 混合网络系统.....	30
4.2 WiMAX/802.16.....	32
4.2.1 OFDMA 符号描述和相关参数.....	33
4.2.2 WiMAX/802.16 帧结构.....	35
4.2.3 WiMAX/802.16 加入中继节点的帧结构.....	37
4.3 适用于协作 PMP/Mesh WiMAX/802.16 系统的帧结构.....	38
4.3.1 适用于 PMP/Mesh WiMAX/802.16 系统的帧结构.....	38
4.3.2 适用于协作 PMP/Mesh WiMAX/802.16 系统的帧结构.....	40
4.4 基于协作的 PMP/Mesh 混合网络结构的 WiMAX 的性能仿真.....	42
4.4.1 系统概述.....	43
4.4.2 系统仿真场景和结果.....	46
4.5 本章小结.....	50
第五章 博弈论在协作中继 WiMAX 网络中的应用.....	53
5.1 博弈论简介.....	53
5.1.1 博弈的分类.....	54
5.2 非对称协作中继模型.....	55
5.3 中继提供给用户服务方式.....	57
5.3.1 先到先服务方式.....	57
5.3.2 采用博弈的改进方案.....	58
5.4 系统仿真.....	59
5.5 本章小结.....	62
第六章 总结和展望.....	63
致 谢.....	65
参考文献.....	67

第一章 绪论

1.1 论文研究背景

无论从什么角度看,无线移动通信都是通信产业中发展最迅速的部分之一。正因为如此,无线移动通信受到媒体和用户的普遍关注。在过去的几十年中,蜂窝移动通信系统经历了指数级的快速增长,全球拥有的用户已超过 20 亿。在大多数发达国家,蜂窝移动电话已成为人们工作和日常生活中不可缺少的工具。在许多发展中国家,蜂窝移动通信系统正在取代着过时的有线通信网络系统。许多家庭、商务区和大学校园已经开始开通无线局域网,它正在补充甚至替代着有线的通信网络系统。

当代无线移动通信主要经历了以下几个发展阶段:

第一代模拟移动通信系统,它采用模拟调制,仅提供语音服务,不提供数据业务,系统容量小,用户信息的安全性差。北美的 AMPS、欧洲的 TACS、北欧的 NMT、德国的 C-450 以及日本的 NTT 等系统是第一代模拟移动通信系统的代表。

第二代数字移动通信系统采用数字调制,相对于第一代移动通信系统,第二代移动通信系统的系统容量大、频谱利用率高、用户信息的安全性好、具有统一的接口、可以实现漫游功能、无缝覆盖,并且除了基本的语音业务,它还可以提供补充业务和承载业务。欧洲的 GSM 系统、美国的 IS-54 和 IS-95、日本的 PDC 等系统都是比较成功的第二代移动通信系统。

第三代移动通信技术(3G),采用智能信号处理技术,实现基于语音业务为主的多媒体数据通信,并具有更强的多媒体业务服务能力和更大的通信容量。第三代移动通信技术的主要特征有:能使用同一部手机实现全球漫游,让任何时间、任何地点、任何人与人之间的通信都成为可能;具有高速的传输速率,在静止或步行的情况下,数据传输速率能达到 2Mbps,在车速的情况下,数据传输速率可以达到 384Kbps;能处理图像、音乐、视频等多种媒体形式。

全球微波接入互操作性(Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX),是基于 IEEE 802.16 标准系列的无线接入技术。

WiMAX 作为 3G 技术的补充。WiMAX 技术具有数据传输速率高、部署简便、受地理环境等客观条件影响少的优点,尤其是在传统带宽接入尚未覆盖的区域以及会展等需要临时性带宽接入的领域,有着得天独厚的优势。

采用 WiMAX/IEEE 802.16 技术标准的 3.5GHz 的综合优点,具有标准化、技术成熟、传输速度快、覆盖范围广、扩容性强和组网灵活的优点、已成为当前运

营商建设宽带城域网时采用的理想的“最后一公里”无线接入手段。

然而处在基站覆盖边缘用户或者当用户走出基站覆盖范围时，由于基站信号到用户的链路状况较差，这使得基站与用户的交互变得困难。我们就需要引入一些技术或方法来改善用户与基站的通信链路状况。

1.2 无线 Mesh 网络

无线 Mesh 网络(Wireless Mesh Networks, WMNs)是一种能够提供高容量、高速率的业务的多点到多点的无线多跳网络，每个用户节点不仅可以收发数据，还可以转发来自其它用户的数据。它与移动自组织网络具有相类似网络拓扑结构，具有一定的自配置、自组织和自我管理特性。但 Mesh 网络一般由若干节点提供类似基站（为了方便起见，我们在本文中称这一类节点为 Mesh 路由器）的功能，这使得 Mesh 网络能方便地和骨干网相连接。用户节点可以不经过基站和网络中的任意其他用户节点进行通信，可以解决无线接入中“最后一公里”的瓶颈问题。无线 Mesh 网络是一种与传统无线网络不同的新型的无线网络技术。

当用户处在基站边缘时，用户可以利用无线 Mesh 网络来传输数据。换句话说，在基站边缘的用户可以使用 Mesh 链路和其它用户节点进行直接通信。无线 Mesh 网络与传统无线移动通信系统相比较，其覆盖范围更大、容量更高。

1.3 协作通信

协作通信技术是为了解决单天线终端用户的空间分集的问题，让单天线终端用户在多用户的环境中可共享其它终端用户的天线，从而获得多天线的分集增益。也就是说，单根天线的终端用户在多用户的环境中，可以按照一定的方式来共享彼此的天线从而产生一个虚拟多输入多输出（Multiple Input Multiple Output, MIMO）系统，从而获得空间分集增益，改善了移动通信系统的性能。

MIMO 多天线技术在无线移动通信中具有明显的优势，并且已逐渐被新一代无线移动通信系统的主流协议所采纳，但仍然存在一些问题。具体的来讲，现有的无线移动通信系统把多天线都设置在基站端，移动终端却很难安置多部天线。这主要有以下两方面的原因。

(1) 移动终端要求终端体积小、质量高和功耗小。移动终端的这些要求远比对基站要求苛刻得多。

(2) 理想的 MIMO 多天线系统要求相邻天线之间的距离要远大于电波的波

长, 并且多个收发天线之间的传输信道是相互独立的(或至少是不相关的), 而移动终端由于要求体积小这方面的制约, 根本无法做到这一点。

目前我们研究的协作通信中的有两种类型。其中的一种类型的协作是与中继信道相类似, 主要是用于改善无线移动通信系统的覆盖能力; 另外一种类型的协作是中继节点既要转发发射节点的信号, 也要发送中继节点本身的信号, 即发射节点也是中继节点, 中继节点也是发射节点。

1.4 协作中继博弈

本文所采用的协作中继博弈是一种动态博弈, 即在此博弈中存在先动者和后动者, 后动者根据先动者的策略来选择自己的策略。在协作中继博弈中, 中继节点和用户节点都以最大化自身效益为目标。中继节点作为博弈的先动者, 根据用户带宽的需求来设定协作带宽资源的价格; 用户节点作为博弈的后动者, 根据价格来决定其向中继节点购买的带宽份额。

1.5 本文的研究内容及章节安排

本文围绕无线 Mesh 网络、协作通信技术, 博弈论等展开分析研究, 采取了理论和计算机仿真相结合的方法, 对比了系统在传输不同的业务流的情况下, 用户间的协作方案下的系统性能, 本文重点讨论的基于协作的 PMP/Mesh 混合网络结构的 WiMAX 系统性能的优越性。主要进行了以下几个方面的工作:

(1) 阐述了 PMP/Mesh 混合结构的系统模型, 较为全面地分析了 PMP/Mesh 混合结构的系统模型的优越性。

(2) 在 PMP/Mesh 混合结构的系统模型中引入了终端用户间的协作技术, 提出了一种基于协作的 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 的帧结构。

(3) 重点研究了处在系统覆盖边缘的用户会寻找其协作伙伴(与用户进行协作通信的另外一个或多个用户), 用户之间的这种的协作关系能带来分集增益, 能使系统的性能得到提升。仿真结果表明, 基于协作的 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 性能比 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 和 PMP WiMAX 两种组网模式的 WiMAX 性能好。

(4) 同时引入了协作中继博弈的带宽分配的方法, 并将其应用到基于 PMP/Mesh WiMAX 网络中, 仿真结果表明, 基于协作中继的带宽资源分配方法由于传统的先到先服务方法。

本论文的结构安排如下：

第二章介绍了无线 Mesh 网络以及其特点。

第三章阐述了协作通信的原理以及各类协作模型。

第四章研究了在无线移动通信网络中同时应用无线 Mesh 网络技术和协作通信技术，在 PMP/Mesh 混合网络结构模型中引入了终端用户间的协作通信技术，提出了一种基于协作的 PMP/Mesh 混合网络 WiMAX 的帧结构。应用了 Matlab 仿真工具，搭建了基于协作的 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 仿真平台，并对其性能（吞吐量、容量等）进行了仿真，并将其与 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 和 PMP WiMAX 两种组网模式的 WiMAX 性能进行了对比。仿真结果表明，基于协作的 PMP/Mesh 混合网络 WiMAX 的性能得到了进一步的提升。

第五章将协作中继博弈的方法引入到 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 中，中继节点和用户之间应用了协作中继博弈的方案实现了对中继节点的带宽资源的分配。仿真结果表明基于协作中继博弈与传统的先到先服务的方法相比较，具有比较好的网络性能。

第六章总结全文内容，指出本课题有待于进一步深入研究的问题，并展望该领域的研究发展趋势。

第二章 无线 Mesh 网络

随着用户对通信网络需求的不断提高,用户希望不论在任何时间、任何地点、与任何人都能够建立有效快速的通信。人们为了克服现有通信系统的缺点,提出了一种新型的宽带无线网络结构,即无线 Mesh 网络(Wireless Mesh Networks, WMNs)。

WMNs 是移动自组织网络的一种特殊形态,它早期的研究源于移动自组织网络的研究与开发,是一种能提供高容量、高速率业务的网络,这一点不同于传统的无线通信网络。WMNs 被写入了 WiMAX/IEEE802.16 无线城域网(Wireless Municipal Area Network, WMAN)标准中.此标准中包含 Mesh 运行模式用以改善网络的覆盖范围和吞吐量。它将是下一代无线通信系统的重要组网技术^{[1][2]}。

WMNs 的提出主要是用于扩展集中式控制网络的覆盖范围,采用类似移动自组织网络的多跳技术,把集中式控制和分布式控制两种方式有机的结合起来。

2.1 无线 Mesh 网络

Mesh 网络(网格网)是指由多个闭合路径的“网孔”组成的网络。用无线 Mesh 技术建设的网络中,每个节点都具有一定的路由选择的功能,节点只和其相邻的节点进行通信。因此 Mesh 网络是一种“自组织”的网络,是一种临时性的、无中心控制节点的通信网络。

WMNs 是一种能够提供高容量、高速率的业务的多点到多点的无线多跳网络,每个用户节点不仅可以收发数据,还可以转发来自其它用户节点的数据。它与移动自组织网络具有相类似网络拓扑结构,具有一定的自配置、自组织和自我管理特性,但 WMNs 一般是由若干节点提供类似基站(在本文中称这一类节点为 Mesh 路由器)的功能,这使得 WMNs 能方便地和骨干网相联结。用户节点之间可以不经过 Mesh 路由器和网络中的任意其它节点进行通信。

WMNs 具有分布式网络的特点,网络结构可以与无线自组织网络一样是点对点的对等结构。通常把没有 Mesh 路由器或者 Mesh 网桥等集中控制器的网络看作是移动自组织网络的一种简化版。Mesh 网络中的用户节点的移动性和用户节点个数跟移动自组织网络相比都较小。两者之间的区别主要是在于网络结构的连接方式上,即无线 Mesh 中的接入点既可以作为 MANET (Mobile Ad hoc network) 的一种对等的的数据转发实体,也可作为连接到其他有线网络的连接器。实际上,无

线 Mesh 网络吸收了星型网与网状网两种网络拓扑结构的优点,它是对这两种拓扑结构的无缝融合。如果说移动自组织网络是一种完全不需要任何基础设施的对等网络,那么 WMNs 就是半分布式半集中式的网络,当 WMNs 中存在集中控制节点 (Mesh 路由器) 时,网络中其它用户节点会以一跳或多跳的方式与 Mesh 路由器相连,网络内外之间的通信必须通过 Mesh 路由器,Mesh 路由器负责调度网内每条链路的通信。正是由于这种可集中可分布式的管理方式使 WMNs 的实用价值提高,因而更加容易被一般运营商们所采纳。

WiMAX/IEEE 802.16 协议中的 Mesh 模式是 WiMAX/IEEE 802.16 协议 MAC 层的可选模式。在 Mesh 模式中,Mesh 路由器与 Mesh 客户端间的数据传输可以通过其它 Mesh 节点中继数据,而不是限制在 Mesh 路由器的一跳范围内;Mesh 客户端之间也能建立直接的通信链路。网络中的 Mesh 客户端除了接收发给自己的信息包外,还要接收传给其它 Mesh 客户端的信息包,并把信息包从一个 Mesh 客户端传递到另一个 Mesh 客户端,直到信息包到达目的地。由于 WiMAX/IEEE 802.16 协议对 Mesh 模式的支持,这样可以使得网络的传输方式从传统的点到多点传输方式转变到可兼容多跳中继的传输方式,这一改变不仅扩大了系统的覆盖范围和提高了系统的吞吐量,还增强了系统的健壮性^[3]。

2.2 无线 Mesh 网络结构类型

无线 Mesh 网络包含了 Mesh 路由器和 Mesh 客户端两种类型的节点。

Mesh 路由器构成 Mesh 骨干网络,并且和有线的 Internet 相连接,负责为 Mesh 客户端提供网关或中继的功能与 Internet 连接。

Mesh 客户端也是 WMNs 的用户端。Mesh 客户端之间可以通过 Mesh 链路进行通信,即使源终端和目的终端不能直接通信,源终端可以有两种方式可以和目的终端通信。第一种方式是源终端通过 Mesh 链路将其所要发送的数据向周围的邻节点进行发送,周围的邻节点接收数据并将已收到数据后再进行转发,直至目的终端接收到源终端发送的数据。第二种方式就是源终端将其所要发送的数据发送至 Mesh 路由器,经过 Mesh 路由器的路由转发,直至目的终端接收到源终端的数据。

WMNs 系统结构根据节点类型和功能的不同分为三类,分别为:骨干网 Mesh 结构、客户端 Mesh 结构和混合结构^[4]。

2.2.1 骨干网 Mesh 结构

骨干网 Mesh 结构是由若干 Mesh 路由器组成一个可以自配置和自愈的链路来充当骨干网,通过 Mesh 路由器的网关功能与 Internet 网络相连,并为覆盖范围内的客户端提供接入服务。这种网络结构下,普通客户端和现有的无线网络也可以通过 Mesh 路由器中继功能接入无线 Mesh 网络,见图 2.1 所示 Mesh 骨干网部分。如果普通客户端具有与 Mesh 路由器相同的无线技术,则它们之间可以直接建立通信链路;若所用的无线技术不同,不同的普通客户端需要先接入具有统一接口的基站然后再与 Mesh 路由器相连。

2.2.2 客户端 Mesh 结构

客户端 Mesh 结构是由 Mesh 客户端组成的在用户设备间提供点到点服务的无线 Mesh 网络。若干客户端组成一个能提供路由和配置功能的网络,支持 Mesh 客户端的应用。由于组成此网络的各节点需要有一定的网关或中继的功能,所以这种无线网络中不需要 Mesh 路由器。结构见图 2.1 所示客户端部分。在这个网络结构中,任意客户端发出的数据包可以经由多个节点的转发直至抵达目的节点,虽然客户端不需要有网关和中继功能,但基本的路由和自组织能力是必须要有的。这种网络结构中的 Mesh 客户端通常只使用一种无线技术。

2.2.3 混合组网结构

在混合组网结构中,如图 2.1 所示,Mesh 客户端可以通过 Mesh 路由器接入骨干无线 Mesh 网络。这种混合组网结构提供了与其它一些网络结构的连接,如因特网、WLAN、和蜂窝网等。同时,客户端的路由功能可以为无线 Mesh 网络增强链路的可靠性和扩大网络的覆盖范围。

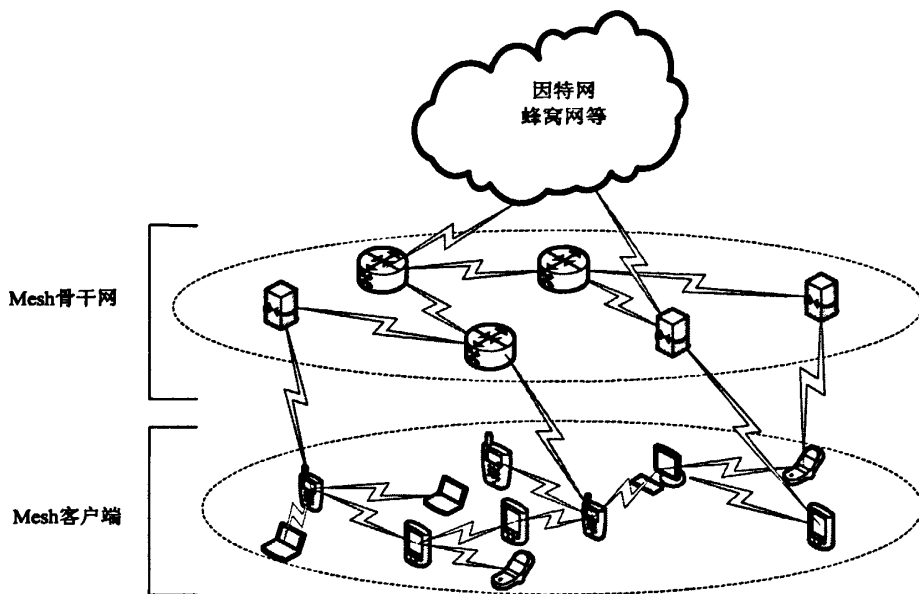


图2.1 无线 Mesh 网络拓扑结构

2.3 无线 Mesh 网络的特征

无线 Mesh 网络采用集中式调度和分布式调度的相结合的方法，它同时具备集中式和分布式的优点，无线 Mesh 网络与传统无线网络相比较有许多优势。

具体的优点主要如下文所述。

2.3.1 可靠性强

无线 Mesh 网络采用的是网格拓扑结构，这就避免了点对多点的星型结构。在以传统的 PMP 传输模式下，通信网络中所有的数据都需要经由中心控制点的转发，一旦中心控制点发生故障或被摧毁，那么此通信网络中的所有客户端都无法继续工作，如蜂窝网系统。

由于集中式的控制方式会出现的业务汇聚、中心网络的拥塞以及单点故障等问题，为了保证通信的可靠性，需要额外可靠性保证成本投资。但是在 Mesh 模式下，通信网络中的每个用户节点存在多条路径与多个其它中心控制节点相连，用户节点是可以绕过发生故障或被摧毁的某个网关或中心控制节点而通过其它节点实现接入，因此，无线 Mesh 网络具有较高的可靠性。

2.3.2 覆盖范围大

终端用户可以在任何地点接入网络或与其他节点联系，与传统的网络相比接入点的范围大大的增强。无线 Mesh 网络中节点之间的通信距离较短，每个通信节点只需要保持较低的发射功率就可以建立通信连接，用户的接入受发射功率的影响较小，同时比较短的节点距离也便于采用视距或准视距的传输，通过中继转发的方式使得网络覆盖范围不再局限在中心点的传输控制范围，而是扩大通信覆盖范围。

2.3.3 可扩展性强

无线 Mesh 网络具有用户自组织的功能，新节点可以自动地被发现并接入到网络中。所以，在组建网的时候，可以在某些地方优化地设置少量的中心控制节点以使用户的接入，随后按需求增加中心控制节点，从而使网络的规模逐渐扩大。无线 Mesh 网络的路由选择的特性使链路中断或局部扩容和升级不会影响到整个网络的运行，因此提高了网络的柔韧性和可行性，和传统网络相比功能更强大、更完善。

2.3.4 频谱效率高

在无线 Mesh 网络中，用户节点和相邻节点得路径较短，相对比较小的发射功率就能满足该短路径所承载业务 QoS 要求，对其它用户节点造成的干扰较小。通过空间复用的技术可以使得多条链路之间互不干扰地同时传输，从而提高网络的频谱利用率。

2.3.5 简化链路设计

无线 Mesh 网络通常需要比较短的无线链路长度，这样的话就降低了天线的成本（传输距离与性能），另一方面，也降低了 Mesh 路由器和 Mesh 客户端的发射功率，也将随之降低了不同系统射频信号间的相互干扰和系统自干扰，最终简化了无线链路设计。

无线 Mesh 网络技术作为新一代宽带无线接入网络技术而备受关注,是通信业界研究热点之一。与传统无线网络相比较具有许多优势,所以无线 Mesh 网络在家庭、企业和公共场所等诸多领域都具有广阔的应用前景。

2.4 IEEE 802.16 的 Mesh 模式

IEEE 802.16 支持两种通信链路模式:

(1) PMP (点对多点) 模式,在这种通信模式下,数据传输的链路方向分为两种一种是下行链路,另一种是上行链路。下行链路就是基站发送数据到终端用户的链路。同理,上行链路就是终端用户发送数据到基站的链路。

(2) Mesh 模式,在这种通信模式下,终端用户之间可以直接建立通信链路,不需要经过基站的的路由的作用。

2.4.1 Mesh 模式

IEEE 802.16 标准支持以下五种不同的空中接口。表 2.1 从用户信道接入方式和所占用的频段等方面进行了归纳。

表2.1 IEEE 802.16 的空中接口

名称	信道接入	频段
WirelessMAN-SC	单载波 TDMA, DAMA/TDM	10-66GHz
WirelessMAN-SCa	单载波 TDMA/TDM	<11GHz 运营执照频段
WirelessMAN-OFDM	OFDM TDMA/TDM	<11GHz 运营执照频段
WirelessMAN-OFDMA	OFDMA	<11GHz 运营执照频段
WirelessHUMAN	以上任意一种	<11GHz 非运营执照频段

IEEE802.16 Mesh 模式支持 WirelessMAN-OFDM 和 WirelessHUMAN 两类型的空中接口。

对于 802.16 网络, Mesh 是一种可选的模式。PMP/Mesh 最大的区别的在于 PMP 模式中业务流仅发生在基站和终端之间, 而 Mesh 模式中业务流可通过其它终端进行路由并且可直接发生在终端之间。根据不同的传输协议算法, 业务流的处理可给予平等的分布调度或者由 Mesh 路由器集中调度, 或者是二者的结合。

Mesh 网络中有三个重要的概念, 分别是邻居、邻居集合和扩展邻居集合。和一个节点直接相连的设备被称为邻居, 一个节点的所有邻居组成一个邻居集合。邻居与节点的距离只有“一跳”。此外, 扩展邻居集合是由所有邻居的邻居集合的组合。

在分布调度式的 Mesh 网络中, 包括 Mesh 路由器在内的所有节点都必须在 2-跳邻居集合内协同传输, 并且应向所有邻居广播其调度表(可能的资源、请求和授权等)。节点应保证在 2-跳邻居节点内的传输不会发生冲突。上行和下行链路绝对调度表的机制是相同的。

在集中调度式的 Mesh 网络中, 资源分配采用集中分配的方式进行。Mesh 路由器收集在一定跳数范围内的各 Mesh 客户端的资源请求, 并决定网络中每条上、下行链路的资源分配。

2.4.2 Mesh 模式帧结构

每个 Mesh 帧包含一个控制子帧和一个数据子帧。如图 2.2 所示。

从下图可以看出, 有的帧由网络控制子帧和数据子帧构成, 这样的帧称为控制帧。类似的, 由调度控制子帧和数据子帧构成的帧称为调度帧。

控制帧按照一定的间隔周期发送, 在控制帧的间隔内发送调度帧。

控制子帧的两个基本功能是:

(1) 网络控制 (network control): 创建和维持不同系统间的协调工作。包括网络接入消息和网络配置消息。

(2) 调度控制 (schedule control): 协调和调度系统间的数据传输。

Mesh 模式下有集中式调度和分布式调度两种调度方式, MSH_CSCH (Mesh Centralized Schedule) 消息和 MSH_CSCF (Mesh centralized scheduling Configuration) 消息用于集中式调度中基站广播调度信息。MSH_DSCH (Mesh Distributed Schedule) 消息用于分布式调度中发送数据前链路连接的建立, 同时节点利用 MSH_DSCH 消息向邻居广播调度表。

网络控制子帧主要用于新节点获得同步和接入网络。控制子帧的长度是固定的(为 $MSH_CTRL_LEN \times 7$ 个 OFDM 符号), 是通过网络描述信息单元 (Information Element, IE) 进行广播的, 其中参数 MSH_CTRL_LEN (Mesh Control Length) 有

4 位 (取值在 0-15 之间)。第一个时隙必须用来发送网络接入 (MSH_NENT) 消息, 这部分主要是为要接入网络的新节点所保留的。剩下的 MSH_CTRL_LEN-1 个传输时隙会携带网络配置 (MSH_NCFG) 消息。网络配置消息主要用来为网络所有节点广播网络配置信息。在发送的网络配置消息中, 包含了所占用的帧号和时隙的号码。根据接收到的这些信息, 节点可以确定帧开始时间, 从而实现与网络的同步。不发送网络控制子帧的物理帧, 其控制子帧部分一定包含调度控制子帧。

调度控制子帧是为在一个共享媒体的网络中共享节点的集中式或分布式调度而定义的。网络描述器会指明一个调度子帧里分布调度消息 (MSH_DSCH_NUM) 的个数: 前 $(MSH_CTRL_LEN - MSH_DSCH_NUM) \times 7$ 个符号包含 MSH_CSCH (Mesh Centralized Schedule) 和 MSH_CSCF (Mesh centralized scheduling Configuration) PDU 的传输突发, 其余的分配给包含 MSH_DSCH (Mesh Distributed Schedule) PDU 的传输突发。在不与控制子帧里的调度消息冲突的前提下, 分布调度消息也可能出现在数据子帧里 (协调调度的 MSH-DSCH 在控制子帧中发送, 非协调的 MSH-DSCH 在数据子帧中发送)。

控制子帧里传输的所有信息都使用 1/2 编码速率的 QPSK, 编码方式也是强制的。数据子帧被分成很多微时隙, 一个调度分配包含一个或多个微隙。

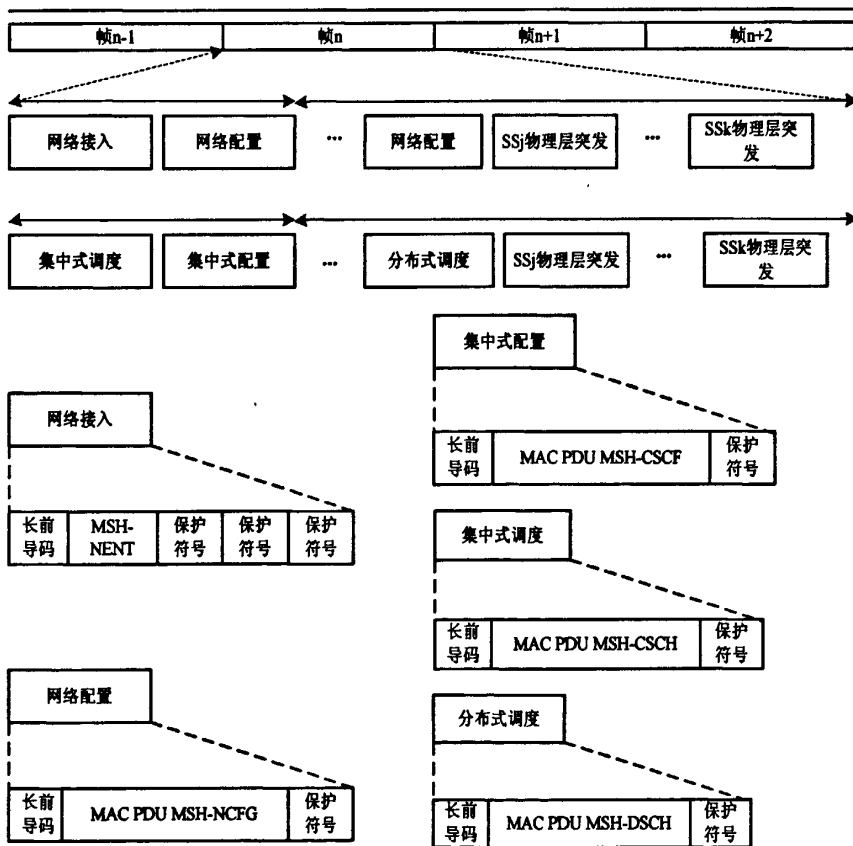


图 2.2 WiMAX/802.16 系统 Mesh 模式下的帧结构

数据子帧传输物理层的突发。物理层突发的开头包含一个长的前导序列，这个前导序列用于系统物理层的同步，紧接着是多个 MAC PDU。其中，每个 MAC PDU 中包含 6 个字节的 MAC 报头，两个字节的节点 ID 的 Mesh 子头、还有一个可选可变长度的 MAC 净荷负载 (0-2039 个字节) 和 4 个字节可选的循环冗余校验 (Cyclic Redundancy Check, CRC) 区域。综上所述，我们可知，一个 MAC PDU 的长度为 12-2051 个字节。数据子帧如下图 2.3 所示。

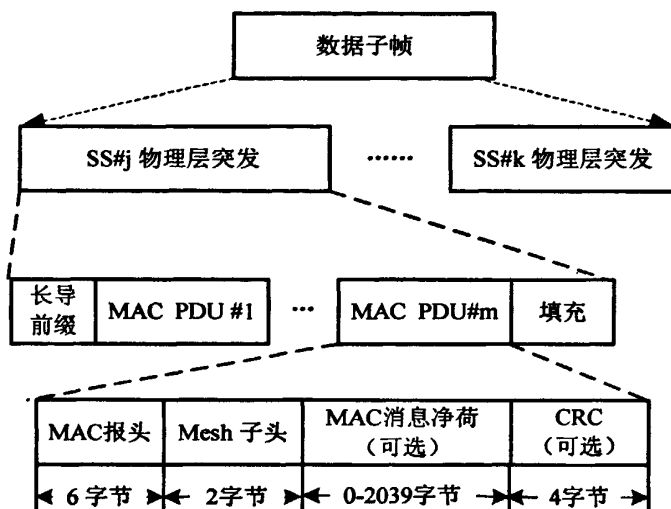


图 2.3 WiMAX/802.16 系统 Mesh 模式下的帧结构中数据子帧的示意图

2.4.3 Mesh 模式的新节点的接入机制

在无线 Mesh 网络中，新节点初始接入网络的方式与 PMP 不同。新节点在接入网络时需要寻求一个网络中已接入的一个节点作为它的负责节点。这一负责节点为新节点开放一个通道，帮助新节点完成基本协商、节点 ID 获取等接入过程。当新节点能够接受系统的调度发送自己本身的数据，其负责节点关闭负责通道，标志着接入过程的完成。

2.5 无线 Mesh 网络的应用及研究现状

2.5.1 无线 Mesh 网络的应用

如 2.3 节所述, 由于无线 Mesh 网络具有的诸多优势, 得到了广泛的应用。目前主要应用在以下领域。

(1) 军事通信, 在现代化的战场上, 由于没有基站等基础设施可以利用, 装备了移动通信装置的军事人员、军事车辆以及各种军事设备之间可以借助无线 Mesh 网络进行信息交换, 以保持密切联系, 协同完成作战任务。

(2) 移动会议

当前, 人们经常携带 PDA(个人数字助理)、笔记本等便携式终端参加各种会议。通过无线 Mesh 网络技术, 可以在不借助路由器、集线器或基站 BS 的情况下, 就将各种移动终端快速组织成无线网络, 以完成提问、交流和资料的分发等任务。

(3) 紧急服务和灾难恢复

在由于自然灾害或其它各种原因导致网络基础设施出现故障而无法使用时, 快速恢复通信是非常重要的。借助于无线 Mesh 网络技术, 能够快速建立临时网络, 延伸网络基础设施, 从而减少由于营救时间过长而带来的危害。

(4) 无线传感器网络

无线传感器网络是无线 Mesh 网络技术的一大应用领域。传感器网络使用无线 Mesh 网络技术, 由于发射功率比较小, 只能采用多跳转发方式进行通信。

2.5.2 无线 Mesh 网络的研究现状

WMNs 目前正处在研究和初步应用的阶段, 同时受到 IEEE 802 无线接入标准化组织的青睐和重视。比如: 在 IEEE 802.11 中提出无线局域网的 Mesh 拓扑结构, 在 IEEE802.16 中提出无线城域网的 Mesh 模式, 在 IEEE802.20 中提出无线广域网的 Mesh 结构。对于 Mesh 技术的研究, IEEE 802.16 标准化组织把主要研究的重点放在了 MAC 层和网络层。

无线 Mesh 网络是多跳中继网络, 在网络结构方面具有星型网与网状网的优点。同时, 每一跳 (Mesh 终端之间的直接通信) 的距离相对较短。对于无线通信来讲, 这样的传输方式可以实现高的传输速率和低的发送功率, 从而达到扩大系

统的覆盖范围,提高系统的吞吐量,和增加系统健壮性的目的。Mesh 客户端在调度方式上可以实现三种调度,即集中式、分布式或者两者的结合,还可以在这三种调度方式下进行高效、公平的数据传输^[5]。这让无线 Mesh 网络比其他传统网络更实用,能够更快速更容易地构建或扩展一个网络。然而,无线 Mesh 技术作为一项新兴的先进技术,国内外的研究现状还仍然处在一个起步发展阶段。网络中的很多关键技术和实现方案(碰撞避免机制、无线路由算法、无线调度算法、交叉层设计等)的研究和完善还没有真正的完成。

先进的 IPv6 技术不仅能提供的庞大的地址空间还具有的诸多优势和功能,使它成为构建下一代无线通信网络的重要基础。有学者预言,最终的通信网络将是有线通信网络和无线通信网络最终融合的全 IP 的网络,这样的网络既具有 IPv6 的优势,即丰富的地址空间,能承载多种业务,提供端到端 IP 连接、可靠的安全性、高的服务质量、移动性、多播、即插即用等;同时也具有无线通信网络的移动性等特点^[6]。以 IPv6 为基础的通信网络将为任何一台终端设备分配一个独立且唯一的 IPv6 地址,使其可以以无线或者有线方式接入 IPv6 网络;这使任何两个终端用户之间都可以进行通信。

无线 Mesh 的研究主要有:(1)无线 Mesh 关键技术的研究,主要包括调度算法研究、碰撞避免机制研究、无线路由算法研究。(2)无线 Mesh 的 MAC 机制的研究,主要包括多天线系统的 MAC 机制研究。(3)无线 Mesh 网络层协议的研究,即无线 Mesh 协议如何与 IP 协议相结合等。(4)无线 Mesh 分布机制以及节点配置,用以保证无线 Mesh 网络的健壮性和通信链路的连通性。

2.6 本章小结

本章主要介绍了无线 Mesh 网络的结构类型和典型特点,以及 IEEE 802.16Mesh 模式的帧结构和在此模式下的新节点接入机制,最后对 Mesh 模式的应用和研究现状做了较为详细的描述。这为本文的系统模型的提出和仿真做了铺垫。

第三章 协作通信

3.1 协作通信技术的发展

协作通信是发展最迅速的研究领域之一，并且它很可能是推动未来有效利用频谱技术的关键技术。这一技术的核心思想是处在一个网络的多个节点之间进行资源共享。发展协作通信的原因是希望相邻节点实现功率和计算的分享，从而实现整个网络资源节约的目的。网状 (Mesh) 网络为实现用户协作策略提供了巨大的应用空间。在传统网络中，物理层只负责将信息从一个节点传输到另一节点。相反，用户协作的实现意味着一个模式的转换，信道不再是一个链路而是网络本身。

只要网络中通信终端的数目超过两个，协作就有可能。因此，一个三终端网络在用户的协作中就可以看成一个基础单元。在大部分参考文献中，一直在讨论一种特殊的三终端信道。

从一个源节点传输到一个目的节点，不借助任何其它的传输情况下的通信叫做直达传输，而用户协作传输在至少有一个额外节点愿意辅助传输的情况下都是可行的。最简单也是最古老的协作就是从源节点到目的节点的基于点对点的锁链状传输的方式。无论是什么信道，随着距离的增加信号都会衰减，这就使得长距离点对点通信变得不现实。这个问题可用一串短距离链路代替一条长距离链路来解决，其中每一个中间节点都有一个增益放大器或中继器来增强信号质量。

文献[7]中最早引入了三终端中继信道，原作中作者 VanderMeulen 得到了中继信道的上下限，并提出了一些有促进作用的观点。虽然一般中继信道容量仍保持未知，但 Cover 和 Game 这两位作者显著改善了 VanderMeulen 得到的上下限^[8]。但值得注意的是，文献[9]发表了对网络信息论很重要的几个信道模型结果的系统评价。

文献[10][11]的杰出工作又引起了人们对用户协作的兴趣，在这两篇文章中，作者提出了一个在移动上行情境下以分集形式建立的用户协作模型，并用多种验证方法证明了这种模型的好处。在他们的研究当中，用户协作分集的概念首次被引入。用户协作分集基本思想是终端用户在通信的过程中寻找一个或多个协作伙伴来转发信号的副本，构成一个虚拟的多天线通信系统。通过终端之间的互助关系来完成彼此到基站的数据传输，最终获得空间分集增益，提高用户传输数据的可靠性。

几乎与此同时, Laneman 等人在 IEEE 信息论汇刊上发表了关于终端用户之间的协作分集的论文^{[12][13]}, 从此开创了研究协作通信技术的热潮, 大量的学术论文也随之涌现出来。

很多学者正在调整研究方向以开发终端用户之间的协作方案, 期望获得信息论中预测的增益。

3.2 协作通信方式

在传统的蜂窝通信系统中, 基站覆盖范围是 2~5km。如果仅仅依赖视距路径传输, 由于存在高大建筑物的反射, 致使信道的阴影衰落会比较明显, 所传输信号的质量和速率相应都会降低。此时, 如果在用户终端与基站之间建立一条高速率和小衰落的信息传输通道, 所传输信号的质量和速率将会得到非常大的提升。

3.2.1 两用户协作通信

在传统的通信模式下, 移动终端用户与基站之间的信息交互是占用单独的时域或频域资源的, 移动终端用户与基站之间的通信链路发生较为严重的衰落, 通信质量将会很差或者直接导致通信链路的的中断。然而, 我们所述的协作通信技术(或称之为协作分集技术)能够克服这一缺点。

下面以蜂窝系统环境下两用户之间的协作通信为例, 介绍一下协作分集的原理^[16]。小区中的每个用户终端都有一个或者多个合作伙伴, 互为伙伴之间的用户除了要传输自己的信息之外, 还要负责传输其合作伙伴的信息。如图 3.1 所示, 两个用户终端 M1 和 M2 互为合作伙伴。首先, 用户终端 M1 除了要向基站 BS 传送自己的信息外, 还要把从 M2 接收到的信息发送给基站 BS。同时, M1 的一部分信息也由 M2 接收, 并由 M2 转发给基站 BS。这样, 用户终端 M1 与基站 BS 之间就产生两条独立衰落路径: 一条是 M1 与 BS 之间的直接传输路径; 另一条是 M1、M2 与 BS 之间的间接传输路径, 这样基站接收了用户终端 M1 的两个独立的信息样本, 仿佛用户终端 M1 本身拥有两个实体天线, 这就模拟了多天线分集系统, 从而达到了空间分集的目的, 提高了基站接收用户终端 M1 信息的可靠性, 这就是虚拟天线的最本质的概念^{[17][18]}。协作通信就是希望借助于合作伙伴的天线, 与其自身天线共同构造多发射天线, 并通过模仿传统的多发射天线分集来获得空间分集增益。如果在某个时段用户没有信息要传送, 那么在没有协作时该终端用户资源

只能闲置，而协作通信则可以用来实现用户资源的充分利用。另外，在用户资源没有闲置时，用户既要传送自己的信息，又要传送其合作伙伴的信息，会牺牲一部分自己的资源，但另一方面，用户也通过协作通信利用了其合作伙伴的空域资源。只要合理地设计协作方案，完全可以做到协作通信带来的增益大于其所付出的代价。总的来讲，协作通信可以更有效地利用整个网络的资源，使网络性能更稳定。

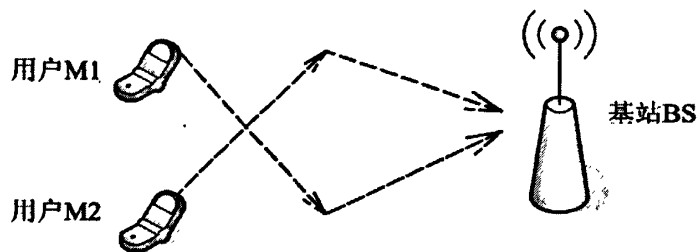


图3.1 两用户协作原理图

3.2.2 多用户协作通信

更为一般地，在多用户协作通信的系统中，每个用户终端节点可以同时拥有多个合作伙伴，来完成自己信息的协作传输。具体的协作过程可以分为两步：第一步，源节点首先以广播方式来发送自己要传输的信号，与此同时，目的节点和所有的中继节点接收信号，中继节点对接收到的信号进行相应的处理，为第二步做准备；第二步，中继节点将处理后的信号发送给目的节点，此时源节点也可以向目的节点发送重复的信息或者新的信息，最后目的节点按照某种规则合并两步接收到的信号。上述过程可以描述如图 3.2 所示。其中，三角形表示源节点，五角星表示目的节点，黑色圆圈表示参与中继的节点，白色圆圈表示其它节点。

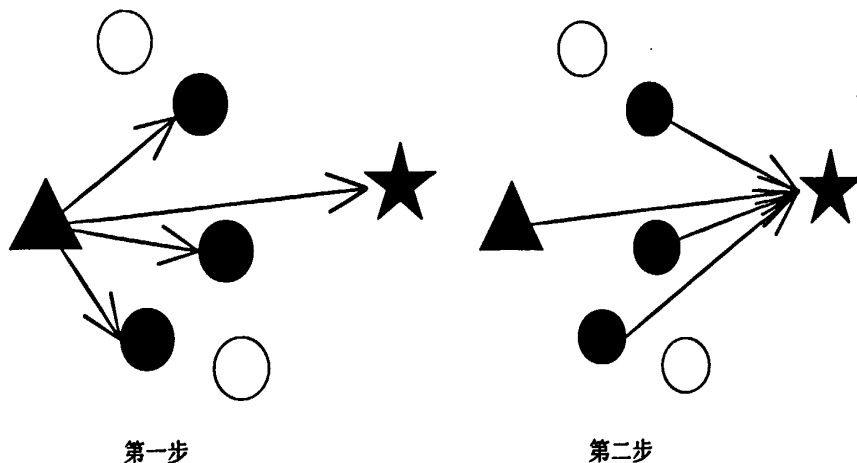


图3.2 多用户协作原理图

为了避免各个用户之间的传输信号的干扰，可以采用正交方式发送数据，如 TDMA, FDMA 和 CDMA 等方式。每一个模型中只有一个源节点，一个目的节点，其余的全部为源节点的合作伙伴（中继节点）。在这一基础上，也可以有多个源节点的网络以及协作伙伴的问题。

3.3 中继模型的分类

在协作通信的过程中，如何高效的利用中继节点协助源节点完成链路通信的传输过程是至关重要的。尤其当源节点与目的节点之间的通信出现故障时，中继节点的设计和应用将直接影响到整个通信传输过程。

根据中继节点对其所接收信号的处理方式不同，人们提出多种中继转发策略。如放大转发（Amplify and Forward, AF）、译码转发（Decode and Forward, DF）以及编码协作（Coded Cooperation, CC）^{[14][15]}。

在多节点的网络中，一个节点分配一个固定的时段或频段进行数据传输，对于不同的网络拓扑结构，中继网络有不同的模型结构^[16]。

3.3.1 单中继双跳中继模型

单中继双跳中继模式是一种简单、传统的中继模式，如图 3.3 所示。在这一模型中，当源节点与目的节点不能进行直接通信的时候，通过中继节点的转发来完成源节点与目的节点的通信。这一模型虽然没有分集的作用，即分集阶数为“1”，

但是当用户不在基站的覆盖范围内的时候，中继节点能够有效地让用户与基站之间建立通信链路。这一模型也对后续提出的协作通信模型的分析起到了关键的作用。

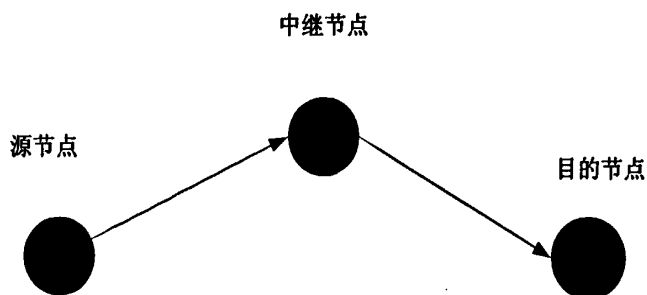


图3.3 单中继双跳中继模式

3.3.2 单中继双跳协作模型

如图 3.4 所示的是单中继双跳协作模型。从图中可以看出，源节点到目的节点之间由两条独立的通信链路：一条是源节点到目的节点的直接通信链路，另一条是源节点的信号通过中继节点的转发到达目的节点的虚拟的通信链路。在瑞利衰落信道下，单中继双跳协作模型可获得分集阶数为“2”。

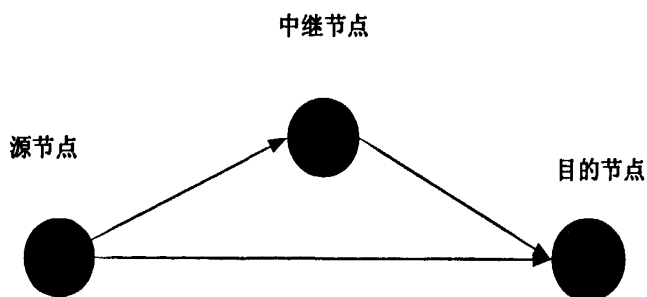


图 3.4 单中继双跳协作模型

3.3.3 多中继并行协作模型

多中继并行协作模型是单中继模型的推广，具体的模型如图 3.5 所示。

在单中继协作模型中，源节点利用一个中继节点来辅助完成与目的节点之间

的通信。

但在多中继协作模型中，源节点利用“ N ”个中继的进行数据的转发，来完成其与目的节点的通信。在此模型中，源节点与目的节点之间有“ $N+1$ ”条独立的链路。如果各链路信道之间是相互独立的，则目的节点可以获得的最大分集阶数为“ $N+1$ ”。

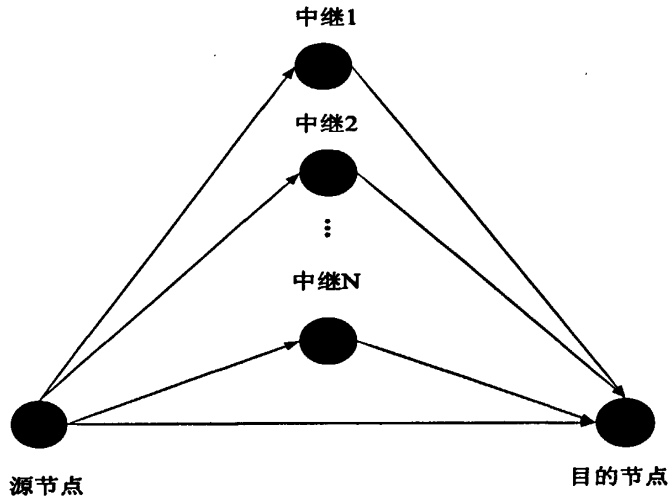


图 3.5 多中继并行协作模型

3.3.4 多中继多跳中继模型

多中继多跳中继模型如图 3.6 所示，从图中可以看出类似于微波中继接力，它也是单中继双跳中继模式的推广。在这一模型中源节点与目的节点之间安置“ N ”个中继节点，源节点的数据依次从源节点传输到第一个中继节点，再从第一个中继节点到第二个中继节点，依此类推，一直到第“ N ”个中继节点，最后一步，就是数据从第“ N ”个中继节点发送到目的节点。

在此模型中，只有源节点与目的节点之间只有一条通信链路，所以不能获得额外的分集增益，即可获得的最大分集阶数为“1”。

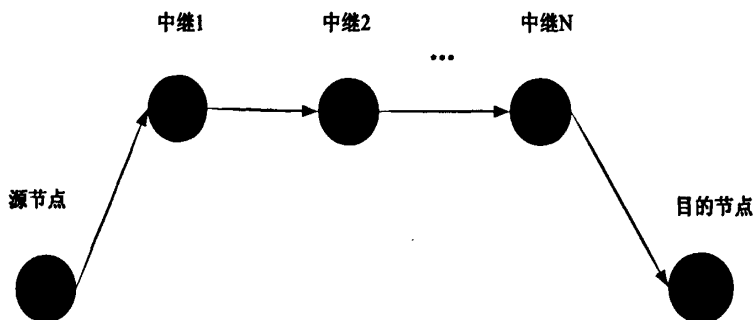


图3.6 多中继多跳中继模型

3.3.5 多中继并行协作模型

在传统的非协作的通信系统中，通信系统分配给每一个中继节点一个频段，在一定的时间内，每一个中继节点都在所分配给自己的频段内传输数据。图3.7所示的是传统非协作通信的通信模型。

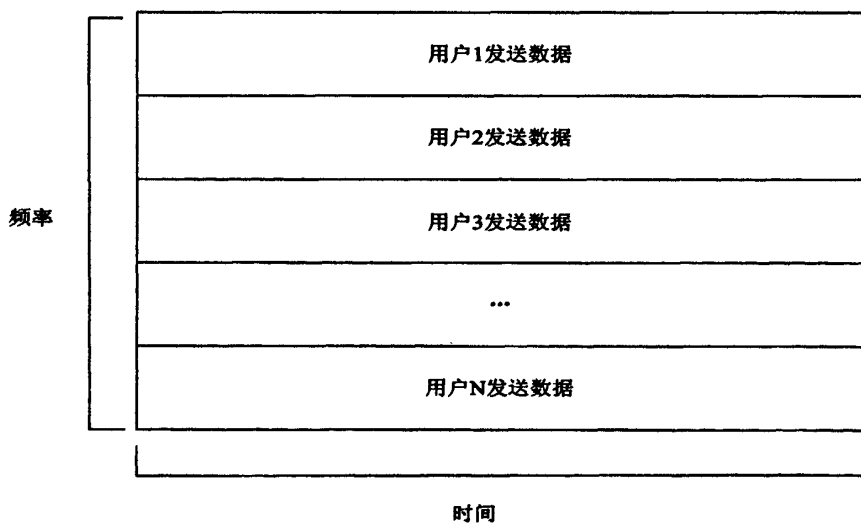


图3.7 传统非协作通信的通信模型

在多中继协作传输系统中，重复编码的协作模式也是一种合理、有效的协作模式。在拥有 N 的用户的模型中，各用户之间存在一种协作关系，每个用户的信息发送分为两个阶段，第一个阶段用户发送自己所要发送的数据。第二阶段，每个用户在不相同的时间段转发其合作伙伴的信息。如图3.8所示。

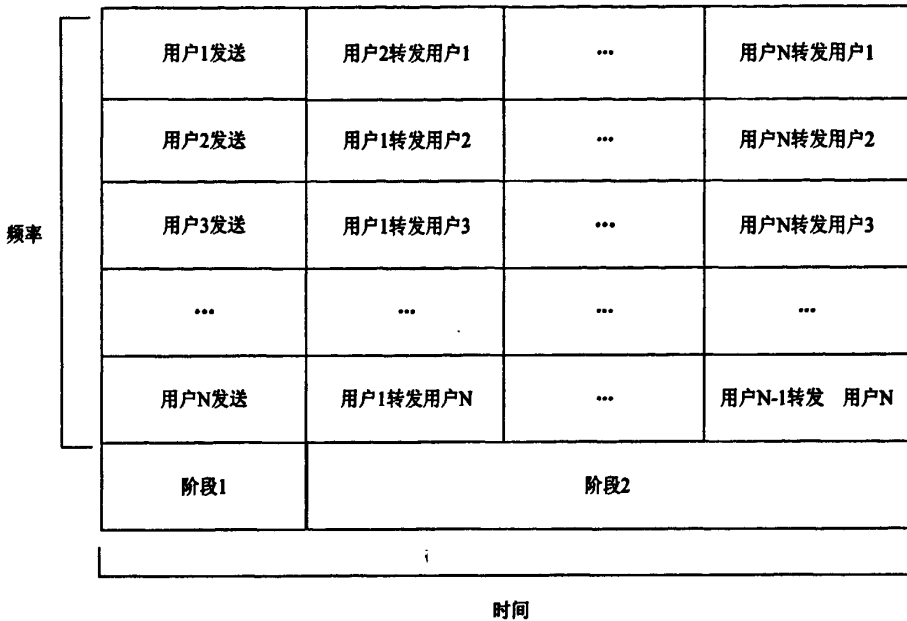


图3.8 重复发送的协作通信模型

空时编码的协作通信模型是比重复编码传输效率更高效的模型。在基于空时编码的协作通信模型中，用户的数据是分两个阶段发送数据。第一个阶段，用户发送自己本身要发送的数据，用户的协作伙伴接收用户所发的数据；第二个阶段，用户的协作伙伴利用空时编码^[12]的方式转发所接收到的信息。如图 3.9 所示。基于空时编码的协作方式，很大程度上缩短了传输时间，从而达到了提升效率的目的。在这个模型中，每个用户或中继节点发送传统的空时矩阵的某一行，在传统的空时编码网络中，对于编码矩阵中的元素是由同一个用户或中继节点的不同天线发送的，这就对网络节点之间的同步提出了更高的要求。

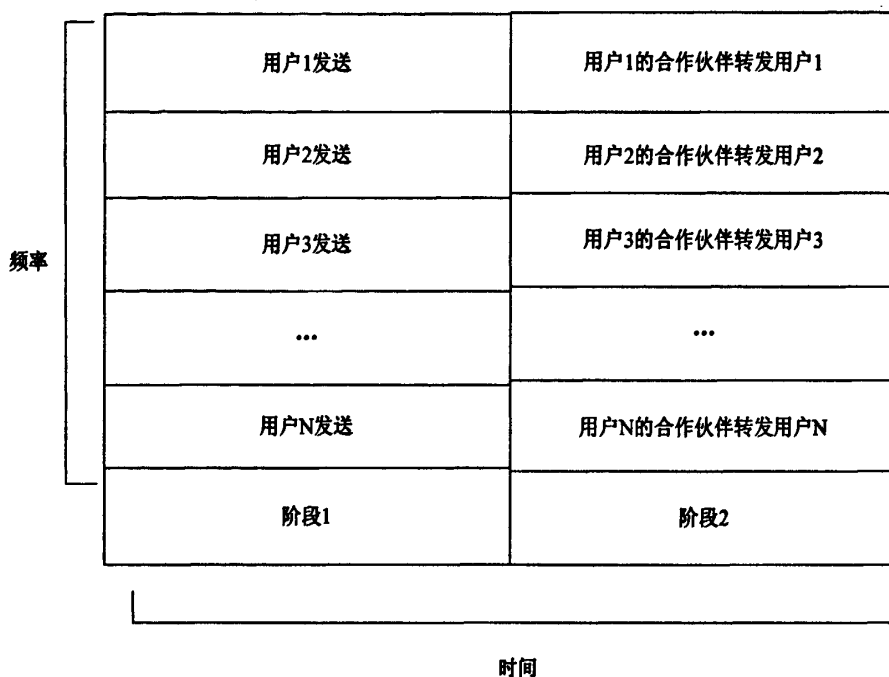


图3.9 基于空时编码的协作通信模型

3.4 分组空时编码在协作通信中的应用

由 3.3.5 节中所述的基于空时编码协作的通信模型可知，空时编码在协作通信中具有更高的效率，本节详细介绍空时分组编码技术。

分组空时编码是多天线通信系统中的信道编码技术^[19]。分组空时码的目标是增强无线通信系统中高速率数据传输的可靠性，它是通过数据流的多副本来实现的，因为到达接收机的某些信号副本会比其它信号副本的损伤要小。这些数据流在多个连续的时隙内被发送到多副天线，也就是说，空时分组码在时间域上和空间域上发射信号。

大部分早期的无线通信只在无线链路的一端（通常是接收机端）设有天线阵列。后来通过在链路两端都设置天线阵列，人们看到了实际系统容量的提升，这些工作扩大了无线通信可能应用的范围，这样的例子有 D-BLAST^[20]和 V-BLAST。在这之后，STC 被提议作为多发射天线、任意接收天线通信方式的一种可选方案。已经得到证实，STC 大大改善了单天线系统的误码性能。STC 的原始方案是基于格型码的，但是这个方案的代价是增加了额外的处理，而这些增加的额外处理量会随着带宽效率和所需要的分集重数的增加而增加。Alamouti 在文章^[21]中建议了

一种简单的分组码的方法，它后来发展演变成了 STC^[22]。

STC^[23]通常有矩阵表示，每一行代表某个时隙各个天线的发送，每一列表示某路天线不同时隙的内的发射如图 3.10 所示：

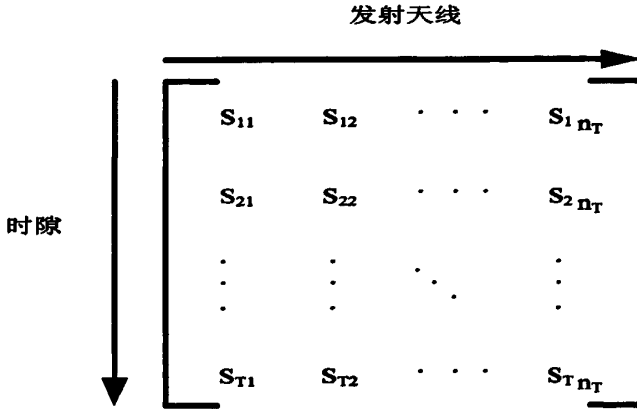


图3.11 STC的矩阵表示

其中 S_{ij} 表示已调符号在时隙 i 内由天线 j 发射，共有 T 个时隙， n_T 副发射天线， n_R 副接收天线。

STC 的编码速率表示一个分组码在一个时隙内发射的符号数，若一个分组码对 k 个符号进行编码，则编码速率为

$$r = \frac{k}{T} \quad (3-1)$$

发射天线的数量不同，STC 可以分成不同的类别。在 WiMAX 中，最简单的传输方式是 Alamouti 方案。

Alamouti 设计了 STC 中的最简单形式，如式 (3-2) 所示，它被设计成 2 副发射天线系统，其编码矩阵为：

$$C = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 \\ -S_2^* & S_1^* \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

其中，式 (3-2) 中 * 表示共轭。

显然，这是一个全速率的编码，它利用 2 个时隙来传输 2 个符号，其误码率等于 $2n_R$ 支路的最大比值合并。这是由于接受处理后符号间是完全正交的，每个发射符号都有两个副本，每个接收信号都有 n_R 个副本。

本文中所提出的是单天线的终端用户在多终端用户的环境中，通过终端用户之间的形成虚拟的多天线系统，也可以获得空间分集增益。

许多学者给出了精确的公式，用来计算在一定的信干噪比的情况下的误比特

率。例如：在 QPSK 调制下的误比特率

$$P_{BER} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\frac{1}{2} SINR}{\frac{1}{2} SINR + 1}} \right) \quad (3-3)$$

对于 2×1 Alamouti 方案在 QPSK 调制下的误比特率：

$$P_{BER} = P^2 (1 + 2(1 - P)) \quad (3-4)$$

其中

$$P = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{4}{SINR} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-5)$$

图 3.11 给出了不同调制方式下 2×1 Alamouti 方案的信干噪比与性能（误比特）曲线。

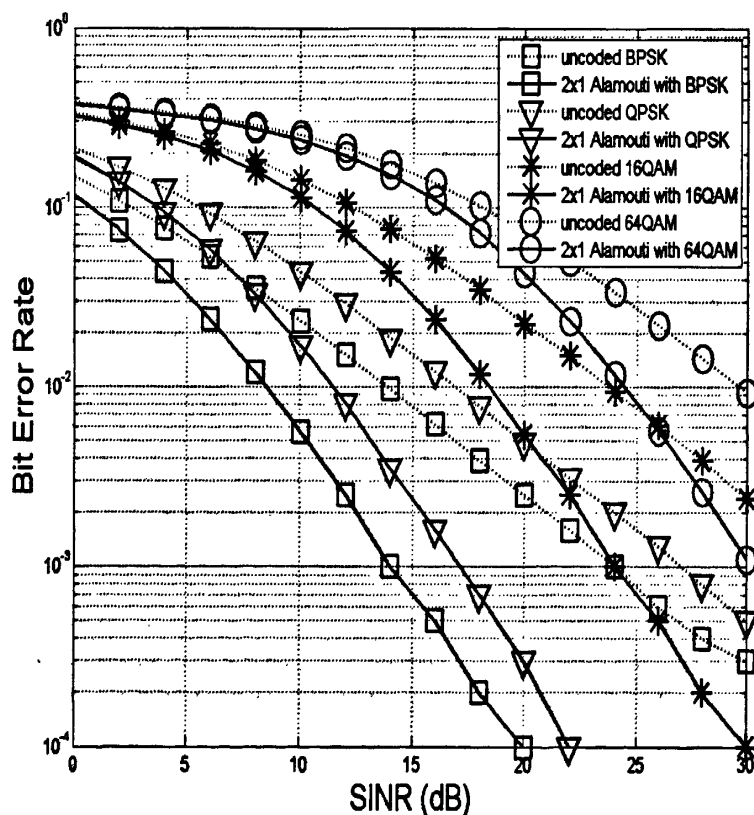


图 3.11 不同调制方式下 2×1 Alamouti 方案的性能曲线

其中，“ 2×1 ”的含义是发射天线数 n_T 的值为 2，接收天线数 n_R 的值为 1。

从图 3.11 可知, 2×1 Alamouti 编码方案下的性能优于非编码方案下的性能。本文第四章的所提出的基于协作 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 帧结构中所应用的就是 Alamouti 的编码方案。

3.5 本章小结

本章主要介绍了协作通信的发展, 并举例说明了协作通信网络中, 用户之间的相互协作过程, 然后对不同的中继模型进行了详细的描述, 这为本文第四章协作帧结构的提出做了理论铺垫, 同时也为本文第五章的非对称协作中继模型提供了理论基础, 最后介绍了空时分组编码技术在协作通信中的应用, 并且分析了其在不同调制方式下 2×1 Alamouti 方案的性能曲线, 为本文第四章协作帧结构中协作方式做了铺垫。

第四章 基于协作的 PMP/Mesh 混合网络结构的 WiMAX

从网络结构上来讲,无线通信系统可以分为两大类,即有基础设施网络结构和无基础设施网络结构^[24]。

本文第二章所述的无线 Mesh 网络就是一种无基础设施网络结构。

有基础设施网络结构是点对多点的网络,因此也叫 PMP 网络模型,如下图 4.1 所示。它是对有线通信网的一种扩展。

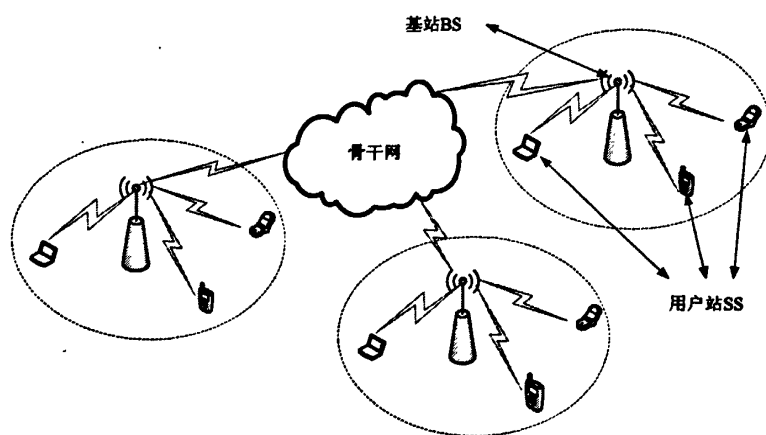


图 4.1 PMP 网络结构示意图

作为骨干网的有线网,连接着一些特殊节点,比如有基站 BS(Base Station)。在无线蜂窝移动通信系统中,我们称之为基站 BS。基站 BS 负责协调覆盖区域内的用户站 SS(Subscriber Station)通过传输信道接入到网络中。

根据 WiMAX/802.16 的定义,PMP 网络中的基站 BS 都能同时与多个独立的 SS 进行交互。在一个给定的频率或者天线扇区内,所有的 SS 都能够接收来自 BS 的相同的数据包。因为在下行链路上,只有 BS 可以发送数据,所以 BS 在发送数据之前也不需要与其它节点来进行协商。有一种情况例外,WiMAX/802.16 系统工作在时分双工(TDD)模式下,BS 需要等待上行链路的数据传输结束后才开始下行链路上的发送操作。因为 TDD 模式下,每个帧被分成上行子帧和下行子帧两部分传输时隙。

一般来说,PMP 网络中的下行链路以广播方式工作。即使下行链路映射(DL-MAP)管理消息没有明显地指出下行子帧中的各部分数据都分别属于哪个确定的 SS,所有 SS 也能够监听其中属于它自己的那部分数据。随后,SS 通过检查接收到的 MAC PDU 中的链接标识符能够确定需要进一步处理的数据单元,即发放该 SS 的数据单元。除了发往某个 SS 的单播消息,PMP 网络中还存在组播和广

播消息。譬如，控制消息以及上层的视频分发业务都可以通过另外的组播和广播两种方式来传输。

在上行方向，WiMAX/802.16 系统中所有的 SS 通过按需分配的方式来分享上行链路的可用资源。根据所使用的服务类别，BS 可以计算得出 SS 可能需要的带宽资源，并通过上行链路映射(UL-MAP)消息通知 SS 已授权的可用带宽。另一方面 WiMAX/802.16 系统中的 SS 也可以根据业务对带宽的请求自主的计算并发出额外的带宽请求来获取发送数据的权利，即由 BS 授权带宽。

在无线 Mesh 网络中，每个接入网络的的节点都具有一定的路由功能，通过存储转发的技术协助其它终端节点构成通信链路，从而完成各个节点之间的交换信息，实现信息和服务的共享。网络中两个无法直接通信的节点可以借助于其他节点进行分组转发，形成多跳的通信模式。

无线 Mesh 网络与有基础设施网络的最大的区别是不需要预先布设的基础设施(基站 BS)，数据传输可以发生在任意两节点之间。网络的组织是临时的、按需的、自动的。无线 Mesh 网络是无基础设施的，无线 Mesh 网络通常应用在没有或者不便利用现有的网络基础设施的情形中。

4.1 PMP/Mesh 混合网络系统

随着无线 Mesh 网络的研究逐渐成熟以及蜂窝网络为代表的网络基础设施网络的逐渐发展，“无线 Mesh 网络与蜂窝移动通信系统的结合”，即 PMP/Mesh 混合网络系统^[25] 应运而生。如图 4.2 所示。这一新型网络系统结构正逐渐引起学术界和通信产业界的关注，被认为是未来无线移动通信系统的重要发展方向之一。

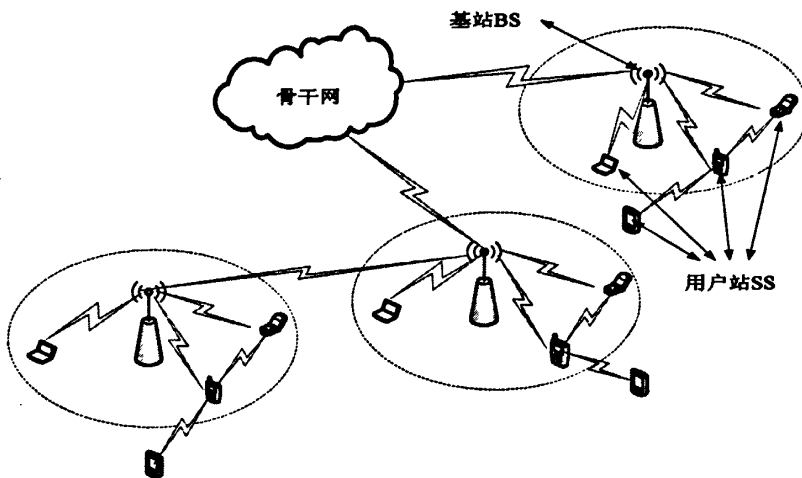


图 4.2 PMP/Mesh 混合网络结构示意图

无线 Mesh 网络的特点能有效地解决现有移动蜂窝系统的一些难点问题。这使得无线 Mesh 网络与蜂窝移动通信系统的想结合的混合网络结构受到通信业界广泛关注。由上可知, PMP 移动蜂窝通信网络模式和无线 Mesh 网络模式相结合后形成的 PMP/Mesh 混合网络系统有许多性能上的优势。

PMP 蜂窝移动通信网络模式的用户终端引入无线 Mesh 网络模式将会带来以下具体的好处:

(1) 扩大了蜂窝通信网络覆盖范围

在 PMP 蜂窝移动通信网络模式下,肯定有一些区域是基站 BS 所覆盖不到的,造成“盲区”的原因有两种,一种是蜂窝移动通信系统的信号达不到的区域,另外一种就是不能传输高速率业务的“盲区”,但这一区域系统的相关信令是可以到达的。PMP 蜂窝移动通信网络模式的用户终端引入无线 Mesh 网络模式,即移动用户终端之间可以通过建立直接的 Mesh 链路,使得处在“盲区”的终端用户可以建立正常通信链接。由以上可以得知, PMP 蜂窝移动通信网络模式的用户终端引入无线 Mesh 网络模式能够有效地扩大了通信网络覆盖范围。

(2) 提高了系统的容量

由于系统支持用户终端之间直接通信链路,即终端节点可以不经过基站 BS 就可以和另一个终端节点通信,这样就减少了对基站 BS 的资源占用,或者当用户处在基站边缘的时候,与基站之间的链路较差,可以通过多跳的无线 Mesh 链路,来达到与基站 BS 的通信的目的。从这个角度来看, PMP 蜂窝移动通信网络模式的用户终端引入无线 Mesh 网络模式能够提高蜂窝通信网络的系统容量。

(3) 支持用户终端之间直接通信链路

系统支持无线 Mesh 的通信模式,即数据的传输可以发生在任意两节点之间。这样的通信模式使得用户传输数据的路由途径可以有更多的选择。例如,近距离终端节点之间的通信,终端节点可以不经过基站 BS 而直接通过终端节点之间的直接发送或者中继转发来完成,从而减少了对基站 BS 的资源占用;另外,在没有或者不便于利用现有的网络基础设施的情形时,终端节点之间仍然可以通过无线 Mesh 链路来达到可以支持一定程度上的通信。

(4) 实现了对通信热点地区的流量转移

当通信热点地区的系统容量已经达到饱和的时候,如果此时还有新的用户需要接入系统,这就造成了系统呼损率的提高。无线 Mesh 网络模式的引入,可以缓解通信热点地区的这一问题,从而可以实现了蜂窝移动通信系统的流量转移。

另外,在蜂窝移动通信系统的基站 BS 之间引入基站之间的无线 Mesh 网络的通信方式,会带来以下好处:

(1) 增强了通信系统的柔韧性

基站之间的引入无线 Mesh 网络的模式能使得整个网络容易实现网络的自我

管理、自我组织、自我修复。当系统的某一个基站 BS 节点出现故障或者由于自然灾害被摧毁而不能正常工作的时候,无线 Mesh 网络的模式能使新的基站 BS 节点快速接入网络,为用户提供服务。这对于发生了地震、水灾、火灾或遭受其它灾难后而造成原有通信系统的被摧毁等状况,具有重要的意义。

(2) 更灵活网络布设

在自然灾害或其它各种原因导致网络基础设施出现故障或无法工作使用时,快速地恢复通信是非常重要的。基站 BS 之间引入无线 Mesh 网络的模式,能够快速接入新的基站 BS,保证网络的正常运行,另一方面可以使得网络减少了对有线资源的依赖或需求,使得网络布设更加灵活。

(3) 降低网络建设和运营的成本

无线 Mesh 网络模式的引入,基站 BS 的预先规划、设计和布设更加灵活;加之基站对有线资源的依赖或需求的减少;基站之间更容易实现自我管理、自我组织、自我修复等能力,这些能大大降低网络建设和运营的成本。

总而言之,PMP 蜂窝移动通信网络模式的引入无线 Mesh 网络模式,可以使它具有更高的自适应能力和更强的健壮性。这些优点得到通信业界的一致认可。

4.2 WiMAX/802.16

全球微波接入互操作 (Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX) 是基于 802.16 标准的一项新的无线带宽接入技术,是针对微米波和毫米波频段提出的一项新的空中接口标准,能够提供语音、视频、数据传输业务以及高速的链接^[26]。

WiMAX 的媒质接入控制层 (Medium Access Control, MAC) 支持点对多点 (Point to Multipoint, PMP) 拓扑结构,Mesh 是它的一种可选的拓扑结构。但是,现有 Mesh WiMAX 的帧结构中,Mesh 的帧结构也不能很好的与 PMP 帧结构相兼容。WiMAX(IEEE 802.16e)应用基于可变的 FFT 的正交频分多址接入 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) 的技术。WiMAX(IEEE 802.16j)中引入中继站 (Relay Stations, RS)的目的是为了解决小区覆盖边缘的无线传输特性和低的信干噪比 (signal to interference and noise ratio, SINR),中继站的引入不仅可以降低基础设施的投入成本,还可以提高整个网络的服务质量 (Quality of Service, QoS)^[27],IEEE 802.16x 的 MAC 层在开辟新的物理层技术,如协作通信技术。

协作通信技术的引入是为了扩大整个无线传输网络的覆盖范围和提高无线链路的可靠性^{[10][11]}。协作通信的基本思想是通过网络中的终端用户之间的相互转

发对方的信息从而形成虚拟多输入多输出 (virtual multiple input multiple output, MIMO), 这样的话, 终端可以在中继信道中获得空间分集增益。分组空时编码 (distributed space-time coding, DSTC) 的出现, 让协作通信技术在系统中的应用成为可能。

Mesh 模式和 PMP 模式帧结构之间的融合和协作通信技术对 WiMAX 的研究有重要的意义。

4.2.1 OFDMA 符号描述和相关参数

OFDMA 物理层基于 OFDM 调制, OFDMA 物理层可采用的 FFT 点数有: 2048 点、1024 点、512 点和 128 点。FFT 可选点数的多样性保证了系统对不同信道的带宽的支持。

在进行初始化接入时, 用户终端扫描和搜索下行信号, 从而确定基站使用的 FFT 点数和信道带宽。

(1) 时域描述

图 4.3 为 OFDMA 信号时域的结构, 其中 T_b 为有用信号帧长, T_g 为循环前缀 (Cyclic Prefix, CP)。如果不使用循环扩展, 那么在保持接收功率不变的前提下, 发射功率随着保护时间的增加而增加, 就会对 E_b/N_0 产生损害。而如果采用了循环扩展, 接收端在整个的扩展符号上进行 FFT, 从而很好地抗多径以及抗符号间干扰。

在初始化时, 移动终端搜索所有可能的 CP 值, 直到找到与当前基站相同的 CP 值为止。移动终端在上行上应与基站使用相同的 CP。而基站一旦选择一个 CP, 将不再更改; 如果基站更改了 CP, 则移动必须与基站从新进行同步。

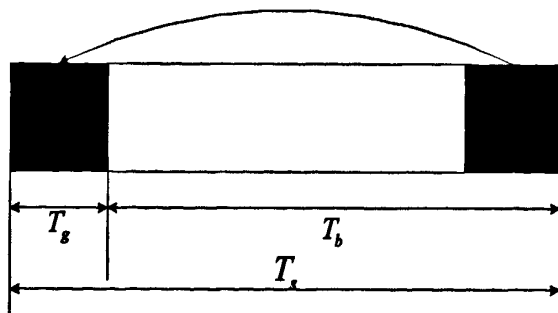


图 4.3 OFDMA 符号时域结构

(2) 频域描述

一个 OFDMA 符号是由多个子载波构成, 子载波的个数决定采用的 FFT 点数。下列给出几种不同的子载波类型:

- 数据子载波：用于传输用户数据和控制信令。
- 导频子载波：用于信道估计和同步。
- 空子载波：不发送信号，用于保护带宽和零子载波。

在 OFDMA 方式下，活跃子载波分成若干个子载波子集，每个子集称为一个子信道。在下行中，一个子信道可能指定不同的接收机；上行中，一个发信机可占用一个或多个子信道，多个发信机可同时发射。组成一个子信道的多个子载波可以相邻也可以不相邻。如图 4.4 所示。

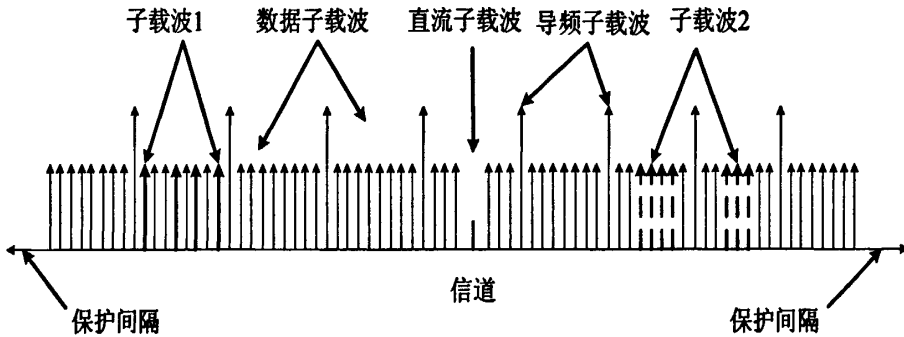


图 4.4 OFDMA 频域描述

(3) OFDMA 符号参数

OFDMA 符号的基本参数有四个，其中 BW 为信号带宽； N_{used} 表示使用的子载波个数（包括零子载波）； n 为采样因子，它和 BW 及 N_{used} 共同决定子载波宽度和有用信号时间，该参数取值如下：若信道带宽为 1.25/1.5/2/2.75MHz 的整数倍，则 $n=28/25$ ；若信道带宽为其他情况，则 $n=8/7$ ； G 表示的是 CP 时间和有用时间的比值，可选值为 1/32、1/16、1/8 和 1/4。

(4) OFDMA 发送信号

式(4-1)给出的是 OFDMA 的发送信号点平值，它是一个时间的函数。

$$s(t) = \text{Re} \left\{ e^{j2\pi f_c t} \sum_{\substack{k=-(N_{used}-1)/2 \\ k \neq 0}}^{(N_{used}-1)/2} c_k e^{j2\pi k \Delta f (t-T_g)} \right\} \quad (4-1)$$

其中， t 是 OFDMA 信号的时间， $0 < t < T_s$ ； c_k 是一个复数，指的是在 OFDMA 符号中要发送的数据，其中子信道的偏移量索引为 k ，它和 QAM 星座图中的某一点相对应，包括该点的相位和幅度参数； T_g 是保护时间； T_s 是 OFDMA 符号时间，包括保护时间； Δf 是在载波带宽。

4.2.2 WiMAX/802.16 的帧结构

WiMAX/802.16 系统中 OFDMA 的物理层支持基于帧的传输。即物理层的数据分帧进行传输的。协议中规定帧长可以为 5ms、10ms 或 20ms。采用 TDD 方式时，上下行子帧的帧长可调^[26]。

图 4.5 所示为 OFDMA/TDD 方式下的帧结构。

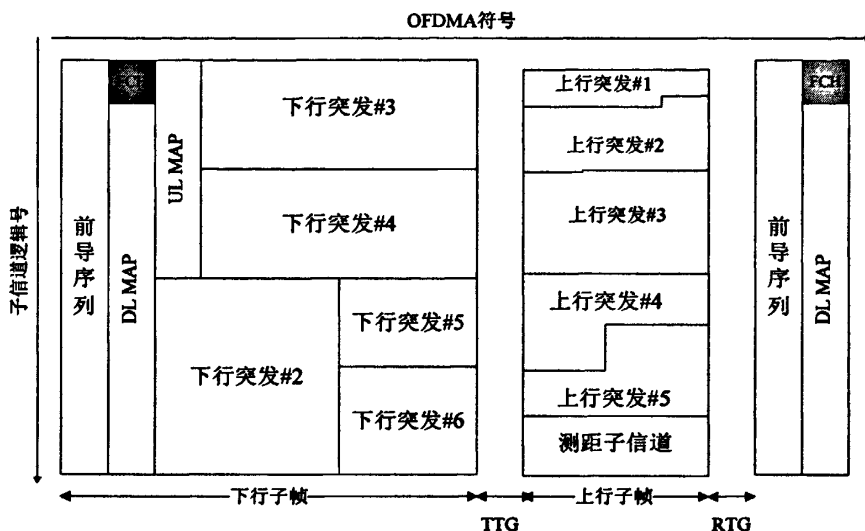


图 4.5 OFDMA/TDD 模式下 WiMAX 的帧结构示意图

从图中可以看出一个 OFDMA 帧是一个时频二维结构，纵轴单位为子载波，横轴单位为 OFDMA 符号。MAC 层调度的最小单位为一个子载波和一个或多个 OFDMA 符号所组成的时隙。每个帧从时域上被分为上行传输周期 (UL) 和下行 (DL) 传输周期两个部分。上行和下行的分界是发射/接收变换间隔 (Tx/Rx Transition Gap, TTG) 和接收和发送变换间隔 (Rx/Tx Transition Gap, RTG)。

图 4.6 所示 WiMAX/802.16 系统 PMP 模式下的帧结构。

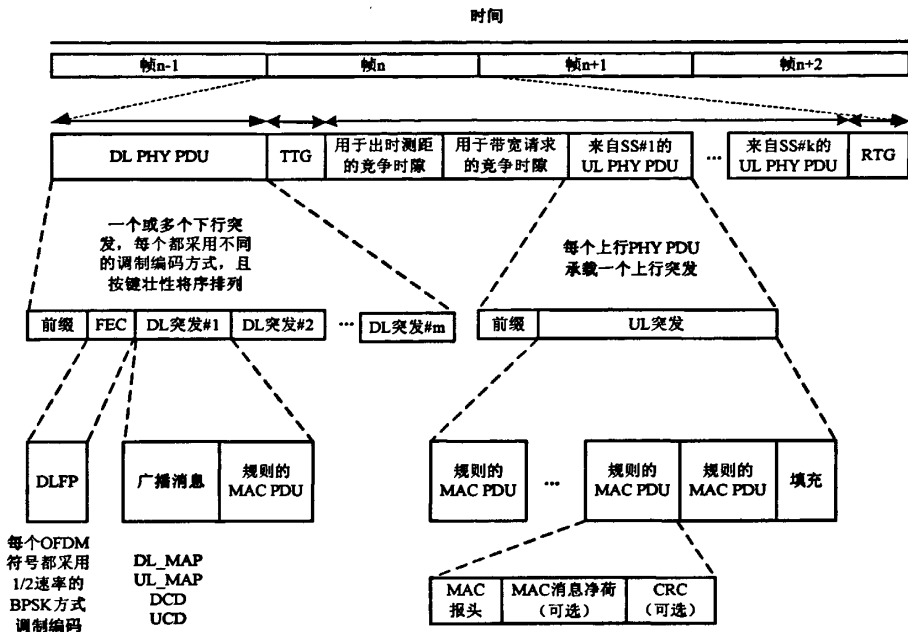


图 4.6 WiMAX/802.16 系统 PMP 模式下的帧结构

下行帧的开始为同步信号(前导序列),紧跟着其后是帧控制头(Frame Control Header, FCH)、DL-MAP 和 UL-MAP。

一个下行子帧只包括一个下行的 PHY 报文数据单元(Packet Data Unit, PDU)。报文数据单元是以长型的前导序列开始,主要用来同步物理层。这个前导序列后面是一个帧控制头(Frame Control Header, FCH)构成的突发。这个突发的长度是一个 OFDM 符号,并且只能采用最可靠的二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)和速率为 1/2 的编码机制进行相应的调制编码。FCH 中有一个 DL_Frame_Prefix,专门用来指出 FEC 之后紧接着一个或多个下行突发(DL Burst)的突发描述和长度。第一个下行突发#1 包含广播的 MAC 管理消息,如 DL_MAP、UL_MAP、下行信道描述符(DCD)和上行信道描述符(UCD)。DL_MAP、UL_MAP 分别定义了下行信道和上行信道的接入机制。DCD 和 UCD 分别定义了 WiMAX/802.16 系统物理层信道特性。

在 FEC 之后的突发,都是发往每个 SS 的数据。通常来说,这些突发都采用不同的突发描述。但是,每个下行突发中所包含的 OFDMA 符号都必须是整数。在下行前缀(DL_Frame_Prefix, DLFP)中,该下行子帧可能包含的下行突发的最大个数以及下行开始的位置会一一指出。但是需要注意的是,真正的数据突发的突发描述以及开始位置是由 DL_MAP 消息指出。在 DL_MAP 消息中,系统会指出该数据采用的编码方式以及开始时间。

在 WiMAX/802.16 系统定义的 OFDM 物理层中,一个物理层突发或者说一个

上行或者下行的物理层突发,所占用的 OFDM 符号数都是整数倍的,不管这个物理层突发承载的是管理消息还是业务数据。为了得到这个整倍数关系,突发净荷中没有使用的字节均用 0xFF 进行填充。

一个上行子帧包括用于初始测距的竞争传输时隙和为了带宽请求的竞争传输时隙以及一个或多个上行物理层传输突发。初始测距是为了执行一些用户进入系统的功能,包括功率控制、时偏调整、频偏调整以及一些基本的管理请求消息;带宽请求传输时隙主要用于用户向基站端发送带宽请求消息。

Mesh 模式下的帧结构详见 2.4.2 节。

4.2.3 WiMAX/802.16 加入中继节点的帧结构

在 IEEE 802.16j 中,引入了中继站(Relay Station, RS)概念,中继站能有效提高提高通信链路的可靠性和系统的吞吐量。

在传统的移动蜂窝通信系统中,基站 BS 与移动终端之间如果仅依靠视距路径(LOS)的传输,由于受到高大建筑物,信道的阴影衰落的影响会非常的明显,信号的传输质量和数据的传输速率都会降低,如果在基站 BS 与移动终端之间安装了中继站,那么就可以在移动终端与基站 BS 之间建立了一条可靠、高速率的链路,通信的信号质量就会得到很大的高,这也是引入中继站的意义。图 4.7 (a) 是在系统和覆盖范围内,移动终端受到高大建筑物的影响。图 4.7 (b) 给出了在基站与移动终端之间加入中继站后的示意图。

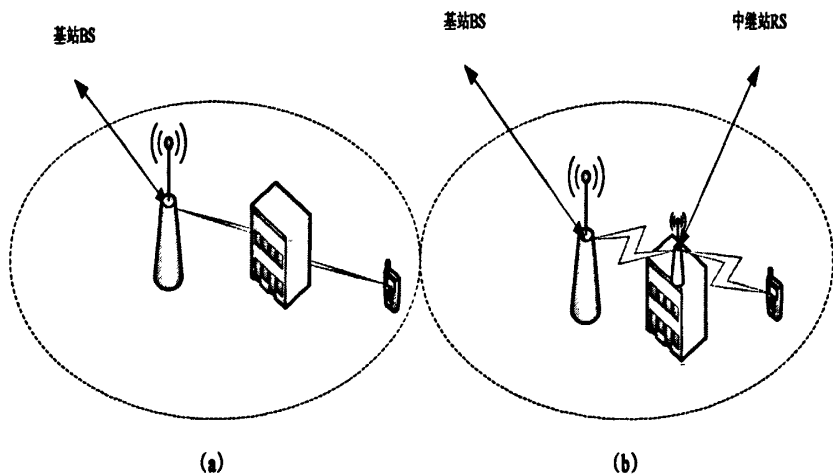


图 4.7 中继站的加入前后通信链路状况的变化示意图

在 IEEE 802.16j 中,每一帧的时间周期是固定的。每个帧从时域上也被分为

上行传输周期 (UL) 和下行(DL)传输周期两个部分, 如图 4.8 所示。每个帧被分成不同的时隙。特别指出的是, 在 IEEE 802.16j 的下行子帧中包含基站 BS 到移动终端 MS, 基站 BS 到中继站 RS 以及中继站 RS 到移动终端 MS 的链路, 同理上行子帧中包含有移动终端 MS 到基站 BS, 中继站 RS 到基站 BS 和移动终端 MS 到中继站 RS 之间的链路。

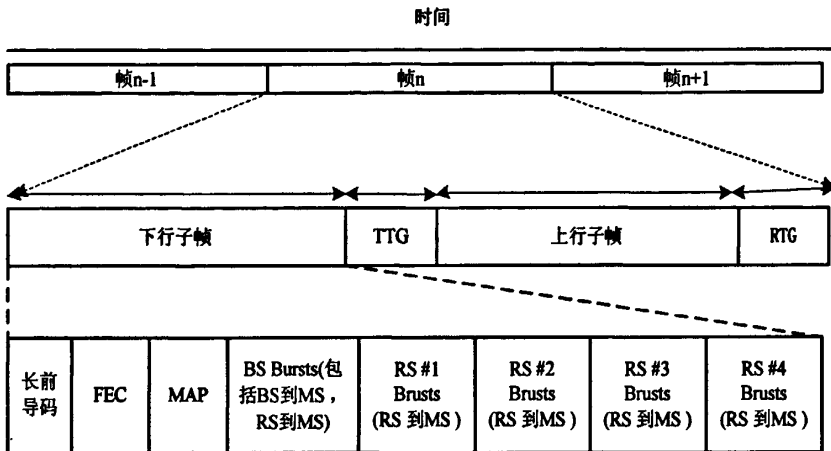


图 4.8 IEEE 802.16j 的帧结构示意图

从图中可以看出, 下行子帧被承载着不同的突发, 有基站 BS 到移动终端 MS 和中继站 RS 的突发和基站 BS 到中继站 RS 的突发。上行子帧与下行子帧相类似。

在每个帧的初始阶段, 基站 BS 和中继站 RS 发送相同的前导序列, 用于同步物理层。这样移动终端可以接入网络, 并可以和所属基站 BS 或者中继站 RS 之间获得同步。

4.3 适用于协作 PMP/Mesh WiMAX/802.16 系统的帧结构

4.3.1 适用于 PMP/Mesh WiMAX/802.16 系统的帧结构

PMP 模式是 WiMAX/802.16 系统的主要拓扑结构, Mesh 是一种可选的拓扑结构。

在 WiMAX 中, 这两种帧结构是单独设计的, 即这两种帧结构是不相兼容的。

这一不兼容性使得网络之间的融合受到一定的限制。本节提出的是 Mesh 帧结构与 PMP 帧结构能够在整个网络系统结构中相互兼容。

在 PMP/Mesh 混合帧结构的设计中, WiMAX 的帧从结构上来分, 可以分为下

下行子帧 (DL) 和上行子帧 (UL) 两个部分, 它也是基于 TDD 的双工方式。在此混合帧结构模型中, 帧的主要结构是 PMP 模式, Mesh 子帧是被嵌入到 PMP 帧结构的上行子帧中的。如图 4.9 所示。这样就实现了 Mesh 帧结构与 PMP 帧结构在系统网络中的融合。

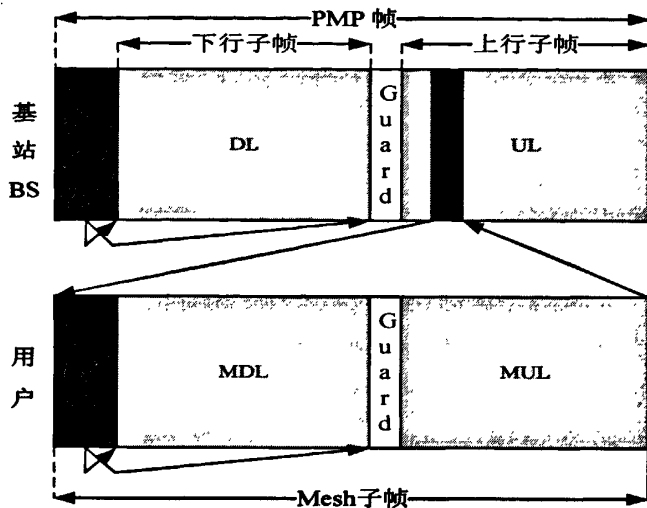


图 4.9 PMP/Mesh 混合网络帧结构示意图

Mesh 子帧被逻辑分为 Mesh 下行链路 (MDL) 与 Mesh 上行链路 (MUL) 两部分。

举个例子来说, 如图 4.10 所示, 基站 BS 与四个移动终端场景的示意图。

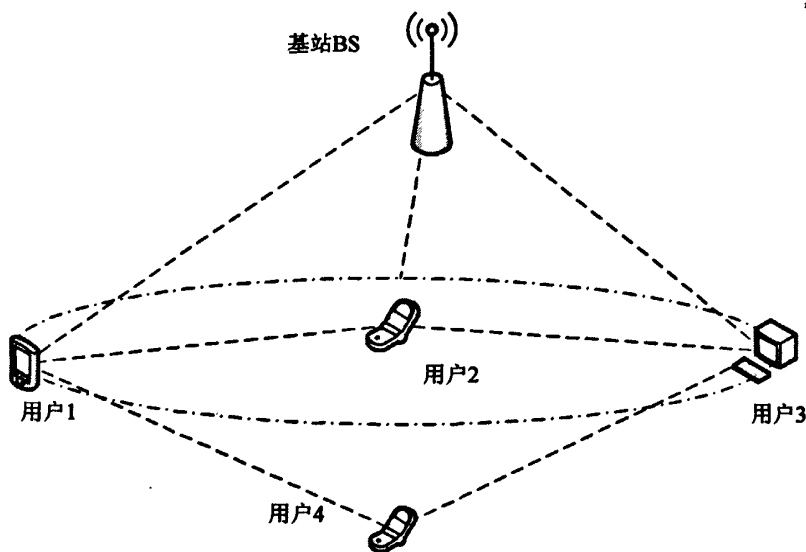


图 4.10 基站 BS 与移动终端的场景示意图

在这个通信场景中, 系统支持 PMP 链路, 基站 BS 在下行子帧中传输分组数据到其覆盖范围内的移动终端 (如用户 1), 同理, 移动终端 (如用户 1) 可以在

上行子帧中传输其数据分组到基站 BS。同时,系统支持 Mesh 链路,用户 1 可以从基站 BS 获得部分的链路分配控制权,并组建属于用户 1 自己本身的 Mesh 子帧。用户 1 在其所属的 Mesh 子帧的 MDL 中传输用户 1 自己本身的数据分组到其 Mesh 帧中所对的下行移动终端节点用户 2,同理,用户 2 可以在此 Mesh 子帧中 MUL 传输自己本身的数据分组到其 Mesh 上行链路中所对应的用户 1。

除了支持 PMP 链路和 Mesh 链路外,还支持中继链路通信。用户 4 是处在基站 BS 的覆盖范围之外,即基站 BS 与用户 4 不能建立直接的 PMP 通信链路。但用户 4 可以通过其相邻终端节点用户 1 与基站 BS 之间建立通信链路。具体的通信过程是:用户 4 首先建立属于自己的 Mesh 帧结构,用户 4 在它的 Mesh 子帧的 MUL 中传输它的自己本身的数据分组到中继节点(用户 1),中继节点(用户 1)在其所对应的的上行链路中将其接收到的由用户 4 发来的数据分组到基站 BS。同理,基站 BS 要发送数据到用户 4,基站 BS 首先将其数据通过下行链路发送给中继点用户 1,用户 1 在此 Mesh 帧的 MDL 中将其收到的数据发送给用户 4。

4.3.2 适用于协作 PMP/Mesh WiMAX/802.16 系统的帧结构

目前的 IEEE 802.16x 标准支持 PMP 和 Mesh 两种拓扑结构。IEEE 802.16j 支持中继的拓扑结构,但是它们没有考虑如何基于 PMP 和中继链路的有效融合,本文提出基于协作的 PMP 和中继站的传输方案。

(1) 协作的 PMP 传输链路

在 IEEE 802.16x 标准中主要支持基于 PMP 的传输链路,移动终端可以通过 PMP 链路与基站之间建立连接,通过基站接入整个通信网络中。当移动终端处在基站覆盖范围的边缘时,由于长距离的信号传输,以及阴影效应的影响,移动终端与基站 BS 之间的链路状况比较差。此时,移动终端将会寻求合适的协作终端从而获得空间分集,达到增强通信链路可靠性的目的。

本文中我们假设每一个移动终端在一跳范围内就可以知道它的邻居终端,移动终端在其邻节点的选择合适的协作伙伴,从而达到协作的 PMP 传输链路。

图 4.11 所示的是基于协作的 PMP 帧结构。

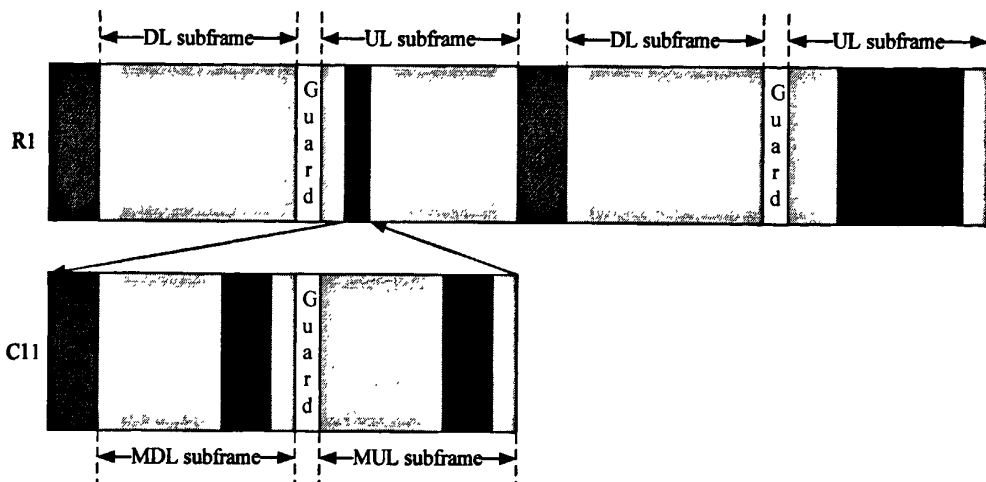


图 4.11 基于协作的 PMP 帧结构

具体的传输过程如下（场景如图 4.10 所示）：

首先，移动终端节点用户 1 建立属于自己的 Mesh 子帧，嵌入到整个 PMP 帧结构的上行链路中。

其次，用户 1 在其建立的 Mesh 子帧中的 MDL 域中传输数据 D_1 给用户 2，用户 2 传输在此 Mesh 子帧中的 MUL 域中传输数据 D_2 给用户 1。

最后，在用户 1 与用户 2 完成它们之间的数据交换以后，这两个用户之间在下一帧中的上行子帧域以 Alamouti 的方式传输给基站，也就是说用户 1 和用户 2 分别传输 $(D_1, -D_2^*)$ 和 (D_2, D_1^*) 到基站 BS，基站 BS 用最大似然的方法进行检测，可以获得的分集阶数为 2。

(2) 协作的中继传输链路

在基于协作 WiMAX 的系统中，用户终端不在基站的覆盖范围之内，它将搜索合适的协作用户来获得分集增益，从而达到增强中继通信链路的状况的目的。在协作的中继传输链路中，我们假设移动终端在其邻节点中选择合适的协作伙伴。

图 4.12 所示的是基于协作的中继帧结构。

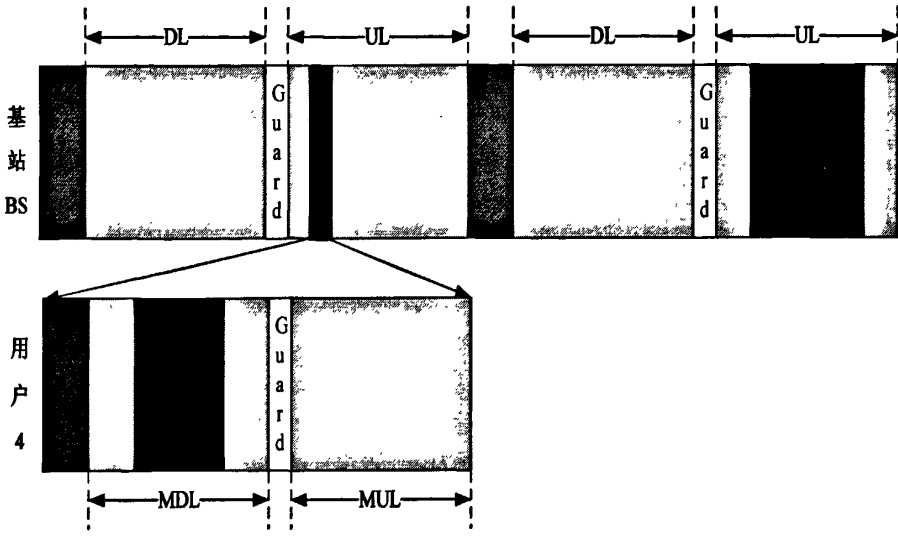


图 4.12 基于协作的中继帧结构

具体的传输过程如下（场景如图 4.10 所示）：

首先，移动终端节点用户 4 建立属于自己的 Mesh 子帧，嵌入到整个 PMP 帧结构的上行链路中。

其次，用户 4 在其建立的 Mesh 子帧中的 MDL 域中传输数据 D1 和 D2 到其两个协作伙伴（比如：用户 1 和用户 3）。

最后，在用户 1 与用户 3 在下一帧中的上行子帧域以 Alamouti 的方式传输给基站 BS，的上行链路传输数据 D1 和 D2 到基站 BS，也就是说用户 1 和用户 3 分别传输(D1, -D2*)和(D2, D1*)到基站 BS。这样就可以获得的分集阶数为 2。

完成它们之间的数据交换以后，这两个用户之间在下一帧中上行子帧域以 Alamouti 的方式传输给基站，也就是说用户 1 和用户 2 分别传输(D1, -D2*)和(D2, D1*)到基站 BS，基站 BS 用最大似然的方法进行检测，可以获得的 2 倍的分集增益。

4.4 基于协作的 PMP/Mesh 混合网络结构的 WiMAX 的性能仿真

本文第二章和第三章分别介绍了无线 Mesh 网络技术的协作通信技术，由以上两章的分析可知这两种技术不仅能使系统的覆盖范围得到扩大，同时让移动终端的通信链路得到改善，从而达到提高系统容量的目的。本文 4.3.2 节提出了一种适用于协作 PMP/Mesh WiMAX 的帧结构。本章用 Matlab 搭建了 PMP/Mesh 混合网络结构仿真系统，在此系统中，我们应用了无线 Mesh 网络技术和协作通信技术，分别对 PMP WiMAX、PMP/Mesh WiMAX 和基于协作的 PMP/Mesh 混合网络

WiMAX 的性能进行了对比。

4.4.1 系统概述

本节从系统模型以及系统的工作流程等做详细的介绍。

4.4.1.1 系统模型

由第二章所述,在混合组网结构中,如图 4.13 所示移动终端可以通过基站 BS、Mesh 路由器或 Mesh 网关接入无线 Mesh 骨干网络。无线 Mesh 骨干网络与核心网相连接。

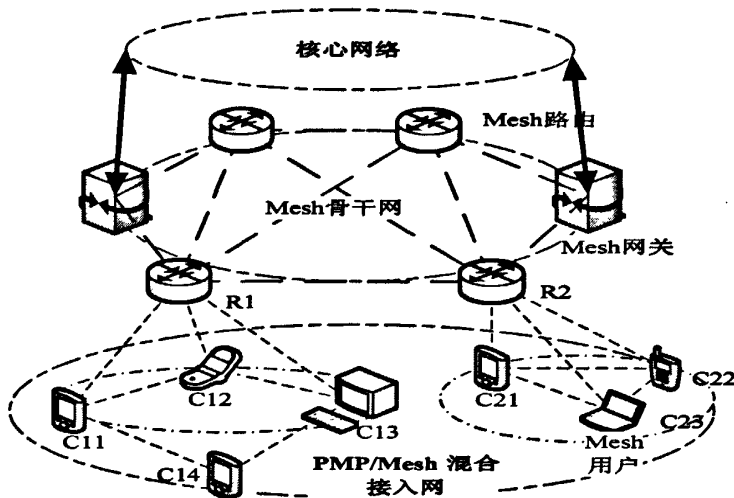


图 4.13 PMP/Mesh 混合网络模型

在此系统模型中,移动终端组成最底层的 PMP/Mesh 混合接入网络,移动终端之间的通信模式有两种,一种是移动终端通过基站或者路由器的 PMP 方式,另一种就是移动终端通过无线 Mesh 之间多跳中继互通。当移动终端节点与基站的链路状况良好的时候,移动终端多以 PMP 的通信模式与基站之间建立直接通信链路。当移动终端的通信目的节点与自己本身相邻或距离较近,移动终端就可以申请 Mesh 模式通信,在其所建立的 Mesh 子帧内,将数据传递给下一个节点。需要指出的是,当与目的节点仅为一跳时,与 PMP 通信模式相比较,可节约一半的无线资源。

4.4.1.2 系统工作流程

基于 PMP/Mesh 混合结构的网络中,网络中帧结构如图 4.6 所示。从图中可以

看出在一个 PMP/Mesh 混合结构的帧中,可以分为下行子帧(DL)和上行子帧(UL)两个部分。帧的主要结构是 PMP 模式, Mesh 子帧是被嵌入到 PMP 帧结构的上行子帧中的。

在每个帧的初始阶段,基站会进行常规的物理层的同步、系统控制信息、功率控制等消息。

在下行周期内,基站 BS 会在初始阶段首先发送下行对应信道上的同步信号和信道估计等消息;紧接着基站 BS 对新申请入网的用户终端或申请业务资源的用户终端做相应的回应;基站 BS 广播系统 Mesh 资源的利用情况以及每一个连接所采用的传输编码方案等。

在上行周期内,移动用户会通过测距子信道来建立与基站之间的同步信号。而且支持上行信道上的功率控制算法,不仅通过测距进行校准,还需要进行周期性的调整过程,即获得资源分配的用户终端会根据自身的同步误差,进行相应的调整。

在上行链路中,用户终端发送一种上行链路的导频信号,基站从各用户终端发射的上行链路同步信号中获得上行链路的响应。在下行链路中,基站将估计网络同步误差,并将相应的估计值通知用户终端。这样用户终端就可以实现与网络的同步。

在基站与终端用户取得同步以后,紧接着进行业务的传输。终端用户会更自身对业务的需求,申请一定的资源。在下行子帧中,基站会发送数据给终端用户,终端用户根据自身的标识判断基站所发数据是不是发给自己的。如果是,终端用户接收数据,如果不是则丢弃该数据。在上行子帧中,当用户有数据发送给基站的时候,如果采用的是 PMP 链路模式,终端用户会在信令信道中申请资源,当其获得分配资源以后,终端用户会利用基站分配的资源进行业务数据的传输;如果采用的是 Mesh 链路模式且目的终端节点在一跳范围内,用户终端可以建立与目的终端用户之间 Mesh 通信链路;如果与目的终端用户之间的通信需要经过多跳 Mesh 链路,则在传输数据的过程中,用户终端在每一跳数据的传输中,要进行路由的选择。

这样就实现了 PMP/Mesh 混合网络的传输。

如果处在系统中的终端用户之间能相互协作,终端用户首先用嵌入上行子帧的 Mesh 子帧中的 MDL 和 MUL 中,相互发送数据,在下一帧的上行子帧中,终端用户之间通过协作来完成数据的传输,这样的协作过程使得终端用户与基站之间的通信链路状况具有很大的改善。

4.4.1.3 系统性能分析

我们为了分析基于协作的 WiMAX/802.16 系统的性能, 我们以下行链路为例来说明。

假设系统中有 K 个基站, 基站 R_j 是用户 C_i 的所属基站。

对于下行链路来说, 当且仅当其它基站 R_k 与基站 R_j 占用相同的子载波和相同的时隙, 用户 C_i 的下行接收才会受到其它基站 R_k 的干扰。公式(4-1)表述了用户 C_i 受到相邻基站 R_k 所带来的的干扰。

$$I_{i,n} = \sum_{k=1, k \neq j}^K (P_{k,n} + G_k - L_{k,j} + G_i - L_i) \quad (4-1)$$

其中, 各个参数值均以 dBm 为计算单位。“ i ”表示受干扰的用户 C_i , “ j ”为用户 i 的所属基站 R_j , “ k ”代表相邻小区的干扰基站 R_k , “ K ”是系统中总的基站数目, “ n ”表示的是用户 C_i 被分配的子信道 SC_n , “ $P_{k,n}$ ”表示的是基站 R_k 在子信道 SC_n 上的发射功率, “ G ”表示的是天线增益, 而“ L_k ”和“ L_i ”分别表示的是终端的馈电损耗, “ $L_{k,j}$ ”表示的是基站 R_k 与用户 C_i 之间的路径损耗。

应用干扰模型, 子信道的信干比的计算为:

$$SINR_{i,n} = \frac{C_{i,n}}{I_{i,n} + N_n} \quad (4-2)$$

C 和 I 分别表示的是接收到信号的功率和干扰信号的功率, N 是子信道的噪声, 干扰信号 I 是根据干扰模型得到的。

接收信号 C 的计算如下:

$$C_{i,n} = P_j + G_j - L_j - L_{j,i} + G_i - L_i \quad (4-3)$$

理论上子信道 (n) 上的用户 (i) 的吞吐量计算如下:

$$T_{i,n} = \frac{\eta_B(SINR, n)}{D_{frame}} \quad (4-4)$$

$\eta_B(SINR, n)$ 表示的是用户 C_i 与基站的信干比为 $SINR$ 时, 在其所对应的子信道 SC_n 上的频带利用率 (比特/子信道), D_{frame} 表示的是帧长。

我们得到图 3.11 的性能曲线图, 就可以计算出误块率(block error rate, BLER):

$$P_{FER,i} = 1 - (1 - P_{BER,i})^{F_i} \quad (4-5)$$

F_i 表示的是数据块中所包含的比特数。

所以用户 C_i 的吞吐量的计算公式为:

$$T_i = \sum_n \left(T_i \cdot \left(1 - BLER_{B(SINR,n)} \right) \right) \cdot v_n \quad (4-6)$$

其中

$$v_n = \begin{cases} 1 & \text{子信道被使用} \\ 0 & \text{子信道未被使用} \end{cases} \quad (4-7)$$

以上所有等式在定信噪比的情况下计算基于协作的 WiMAX 的吞吐量。同理, 上行链路相类似。

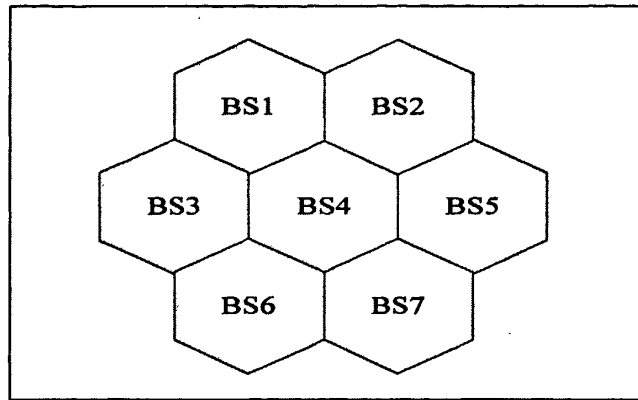
4.4.2 系统仿真场景和结果

4.4.2.1 系统的仿真场景

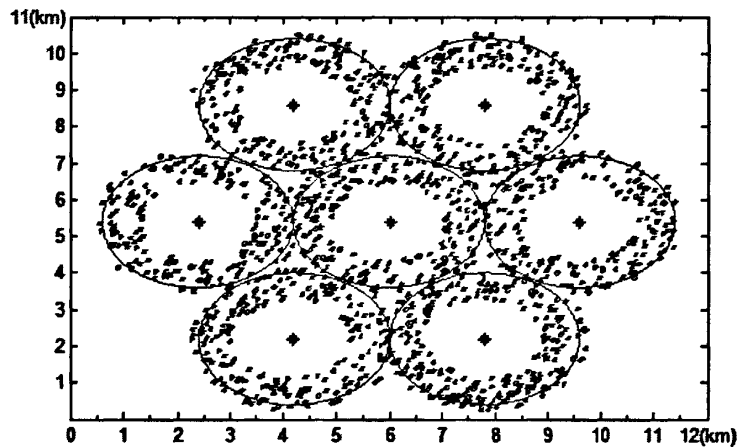
作者根据 IEEE 802.16e 的参数, 建立系统模型。在此模型中应用第四章所描述的基于协作的 PMP/Mesh 混合网络 WiMAX 的帧结构。在仿真中, 在每一帧中上行子帧与下行子帧所占时长的比率为 1:1。同时支持无线 Mesh 链路和中继传输链路。对于 Mesh 子帧来讲, 它是嵌入到上行子帧中的, 在系统中我们设定传输 Mesh 业务所用的资源最多可占上行资源的一半, 如果 Mesh 资源的申请量较少, 有些没有被占用的资源, 仍然可以被 PMP 上行子帧所使用。

为了仿真基于协作的 PMP/Mesh 混合网络 WiMAX 的性能, 用来系统仿真的参数都是从 IEEE 802.16e 中获得。我们建立一个基于协作的 PMP/Mesh 混合网络 WiMAX 的系统结构, 网络中包含 7 个基站和 4000 个终端用户节点。作者考虑的是 12km×11km 的仿真区域。为了简单起见, 本文仿真只考虑上行链路。

如图 4.14 所示的是系统的仿真场景。(a) 所示的是理论系统模型; (b) 所示的是系统仿真的拓扑结构。从图中可以看出, 系统基站 BS 与终端用户节点随机分布在各个基站的边缘。



(a) 理论系统模型



(b) 仿真系统模型

图 4.14 系统模型

4.4.2.2 基于协作 PMP/Mesh WiMAX 的系统仿真结果

在给定以下不同带宽,对于 64Kbps 业务量的条件下,仿真基于协作 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 与 PMP/Mesh 混合网络 WiMAX 和 PMP WiMAX 的性能比较。

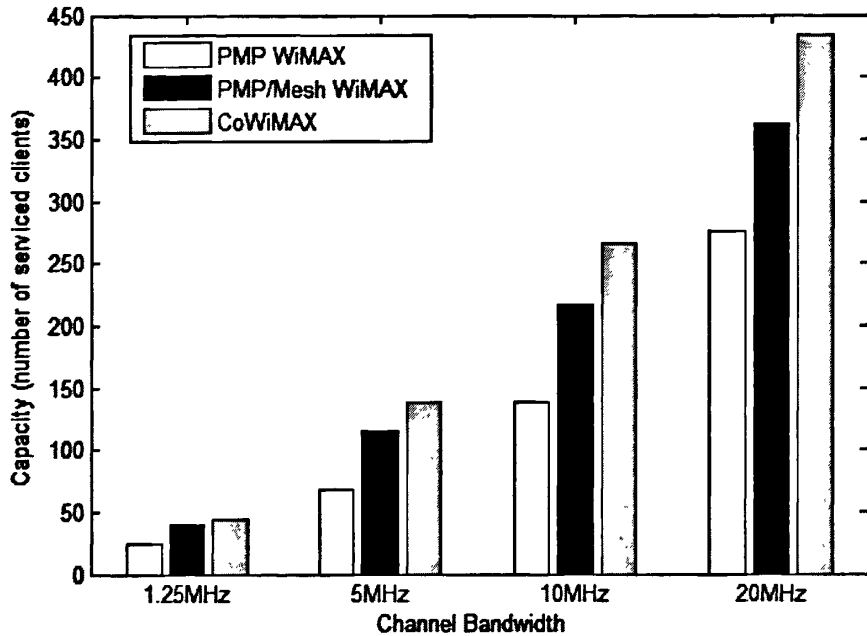


图 4.15 系统容量 (用户数目) 与带宽之间的关系

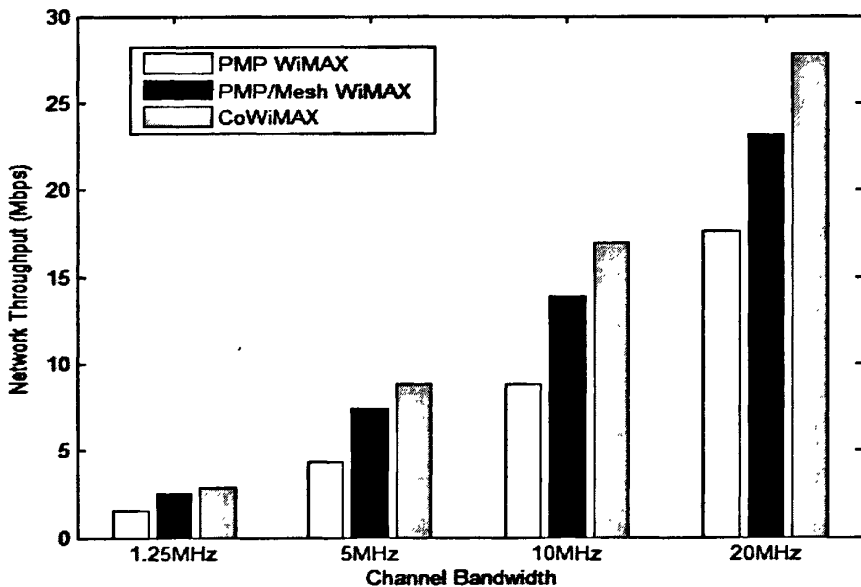


图 4.16 小区平均吞吐量与系统不同带宽之间的关系

图 4.15 说明了系统容量 (用户数目) 随着带宽的增加而不断增加。

由于无线 Mesh 技术的应用, 移动终端之间可以直接建立 Mesh 通信链路, 使得处在“盲区”或者基站覆盖边缘的用户也可以得到服务。我们可以看出 PMP/Mesh 混合网络 WiMAX 的系统容量优于单一的 PMP 网络。由于协作通信技术在 PMP/Mesh 混合结构 WiMAX 中的应用, 处在“盲区”或者覆盖边缘的用户之间不仅可以建立通信链路, 而且可以通过用户之间的相互协作, 从而获得分集增益,

达到增强链路可靠性的目的。从图中可以看出，基于协作 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 的系统容量大于 PMP/Mesh 混合网络 WiMAX 的网络容量。

图 4.16 表示出了 WiMAX 系统的吞吐量随着系统带宽的增加而得到提高。随着系统带宽的增加，用户所受到的干扰也随之减小，是因为在相同的时隙相同频率下，系统的终端用户接入的概率相对比较小。

无线 Mesh 技术的应用，用户之间的直接传输可以节约系统的资源，使得基站能够提供更多的资源给其他终端用户，从而提高系统的吞吐量，即 PMP/Mesh 混合网络 WiMAX 的系统吞吐量同样优于单一的 PMP 网络。协作通信技术应用于处在基站覆盖边缘的用户，用户之间通过相互协作，提高用户到基站之间的链路的可靠性，传输数据包的成功率就增加，从而系统的吞吐量得到提高。从图中可以看出，基于协作的 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 的系统吞吐量大于 PMP/Mesh 混合网络 WiMAX 的系统吞吐量。

以下两个仿真图是在给定带宽为 20MHz 的条件下，对于移动终端不同的业务需求，如：语音 (64Kbps)、网页浏览 (128Kbps)、视频 (512Kbps) 以及文件下载 (1024Kbps) 等四种不同的业务模式下的网络性能的比较。

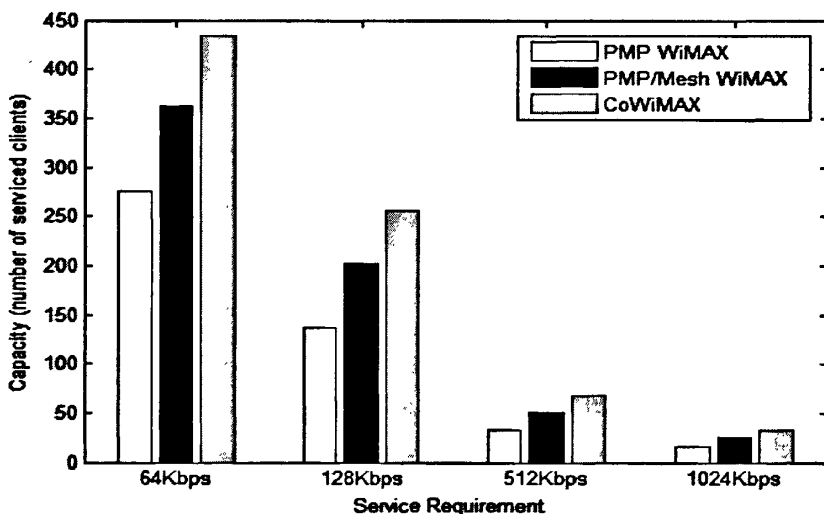


图 4.17 系统容量 (用户数目) 与移动终端的不同业务需求之间的关系

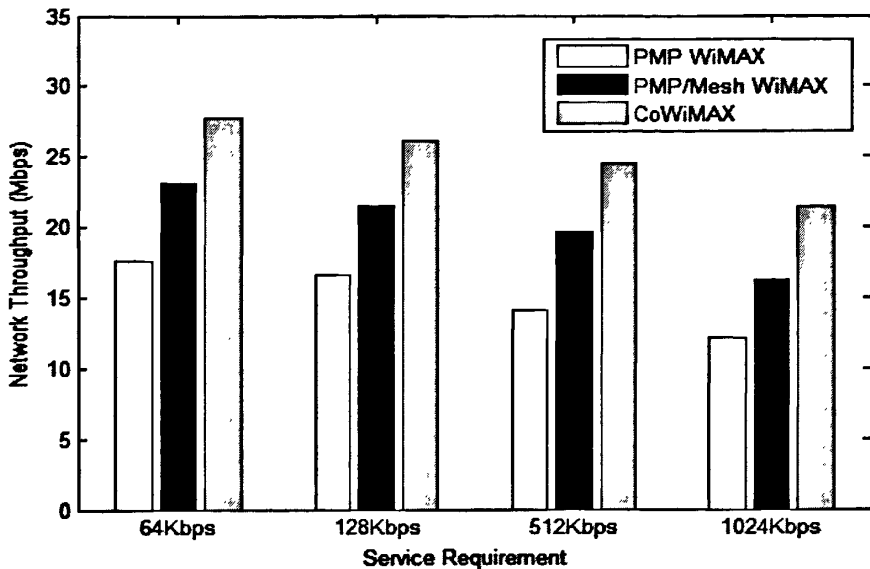


图 4.18 小区平均吞吐量与移动终端的不同业务需求之间的关系

由图 4.17 可以看出,随着终端用户对业务需求申请的不不断提高,每个小区容纳用户数目随之减少,即在可利用的资源一定的条件下,每个移动终端用户申请的资源越多,系统所容纳的用户数就会就减少。尤其在低速率业务,如语音(64Kbps)和网页浏览(128Kbps)需求的时候,系统能容纳的用户数目较多,当移动用户在高速率业务的时候,系统能容纳的用户数目较少。同样我们可以图中看出,PMP/Mesh 混合网络 WiMAX 的系统容量优于单一的 PMP 网络,基于协作的 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 的系统容量大于 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 的网络容量。

图 4.18 表明的是系统吞吐量随着终端对业务需求的变化示意图。从图中可以看出,随着终端对业务需求的不不断提高,整个系统的吞吐量随之缓慢下降,主要是因为高速业务的传输环境下,系统误包率将随之较高。当用户需求的是低速率业务的时候,系统的所提供的资源能够为更多的用户提供服务。同样的,基于协作的 PMP/Mesh 混合网络 WiMAX 的网络吞吐量大于 PMP/Mesh 混合网络 WiMAX 和 PMP WiMAX 的网络吞吐量。

4.5 本章小结

本章首先提出了 PMP/Mesh 混合网络结构,并介绍了基于这一混合网络的帧结构,并提出了一种适用于协作 PMP/Mesh WiMAX 系统的帧结构。其次对系统的模型、工作流程以及性能进行了介绍和分析,最后对基于协作的 PMP/Mesh 混合网

络的 WiMAX 吞吐量以及容量等性能进行了仿真,并将其与 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 和 PMP WiMAX 两种组网模式的 WiMAX 性能进行了比较。仿真结果表明,基于协作的 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 性能得到了进一步的提高。

第五章 博弈论在协作中继 WiMAX 网络中的应用

5.1 博弈论简介

在无线通信系统中,为了减弱衰落,提高通信质量,用户与中继之间的协作将成为提高无线通信系统和网络性能的主要技术之一,也就是本文所提出的协作中继。协作中继的基本思想是中继节点以转发信息副本的方式来帮助数据源节点进行数据的传输。协作中继充分地利用了无线广播信道的特点,有效地获得了协作分集增益。

目前工作大部分的研究都是基于网络节点完全参与协作的假设,而在商业性网络中,帮助其他节点进行数据中继是需要资源(能量、时间、带宽等)开销的;因此必须采取有效的协作机制激励节点积极参与协作。

博弈论可以十分有效地解决上述协作中继过程中的资源分配问题。

博弈论^[28]中就是关于相互依存情况中理性行为的研究。所谓依存,通常是指博弈中任何一个参与者受到其他参与者的影响,反过来,它的行为也影响到其他参与者。由于这种相互依存性,博弈的结果依赖于每一个参与者的决策,没有一个参与者能控制所要发生的事情,也没有一个参与者处于孤独状态。相互依存常使博弈的参与者之间产生竞争,然而竞争仅仅是博弈论中相互依存的一个方面,通常地博弈论并非纯粹的是参与者之间的竞争,相互依存的另一个方面是参与者可以有某些方面的共同兴趣或利益所在。

在博弈论中还需要对一个词“理性行为”做一些说明。在博弈论中所谓的理性,一般不是指道德标准。从参与者的眼光来看,他们试图去实施自己认为可能最好的行为,尽管这样的行为有可能损害了其他参与者。从参与者的角度来看,

提高了自己的收入,博弈论研究(和通常的经济学研究)认为这是理性行为。因为“理性行为”似乎有点“利己,不管它是否损人”。从博弈分析人员的“旁观”眼光,一般不会去擅自判断参与者的动机究竟是如何。或许人们认为参与者的目的行为近乎疯狂,但是如果局中人是有意地、系统地继续行动的话,我们认为是理性的。

博弈由于参与者的相互依存性,博弈中的一个理性的决策必定建立在预测其参与者的反应之上。一个参与者将自己置身于其他参与者的位置并为他着想从而预测其他参与者将选择的行为,在这个基础上该参与者决定自己最理想的行动,这就是博弈论的方法的本质与精髓。

博弈论^[28]中每一个参与者做出理性的决策的重要依据之一是他的可能盈利有

多少, 这就是一个参与者需要计算盈利函数 (payoff function)。对于每一个参与者, 如果他们在可供自己选择的策略空间中任取一策略作为自己的行动, 既不会给自己带来盈利, 又不会使他们必须付出, 这种失去了激励机制, 也就失去了“博”的意义。盈利函数的结构与取值无疑将会影响到参与者的行为, 因而也影响到博弈的最终结局。由此, 盈利函数的确定在博弈论中是件非常重要的事情。从对博弈的不同角度考虑, 从参与者的不同观点出发, 可以有形形色色的盈利函数。

5.1.1 博弈的分类

从博弈论的基本刻画可以看出, 无论什么样的博弈, 总是存在着如下三个要素:

(1) 参与者, 以 $i=1, 2, \dots$ 表示。

(2) 每一个参与者一般有若干个策略 (strategies) 可供选择, 它们构成了该参与者的纯策略空间。参与者 i 的纯策略空间用 S_i 表示, 倘若 S_i 由 k_i 个纯策略构成, 则有 $S_i = (s_{i1}, s_{i2}, s_{i3}, \dots, s_{ik_i})$ 。

纯策略空间有时也可以是连续的。

(3) 每一个参与者的盈利函数。我们计参与者 i 的盈利函数为 $u_i(s)$, 其中 $s = (s_1, \dots, s_r)$, 而 $s_j (1 \leq j \leq r)$ 表示参与者 j 所取得策略, s 表示 r 个参与者的策略向量。显然, 盈利函数 $u_i(s)$ 与 s 有密切关系。它是每个参与者真正关心的东西。

策略空间 (策略)、盈利函数 (效用) 以及参与者的与博弈有关的特征等知识构成博弈的信息, 从信息的角度, 博弈可分为完全信息和不完全信息两类。所谓完全信息是指每一个参与者对于自己以及其它参与者的策略空间、盈利函数等知识有完全的了解, 否则博弈就是不完全信息的。

博弈的分类还可以从参与者行动的先后次序着手, 如果参与者同时选择, 则称博弈为静态的。要求“同时”并不一定等于规定在同一时刻大家一起行动。通常在时间上虽有行动的先后, 但参与者彼此不知道其他人在采取什么具体行动 (直到博弈结束时), 其效果仍等价于他们在同时行动, 此时我们仍称它是静态博弈。倘若参与者的行动有先后顺序, 后行动者可以观察到前行动者的行动, 并在这基础上采取自己最有利的策略, 博弈就转化为动态形式。

上面有两种划分类型中各自存在的两种情况, 如果两两交叉, 就可以得到完全信息静态博弈、完全信息动态博弈、不完全信息静态博弈和不完全信息动态博弈四种情况。无可非议, 不完全信息要比完全信息复杂一些, 而静态的远比动态简单得多。

本文所用的是完全信息动态博弈。

总的来说, 博弈论就是分析博弈参与者竞争和协作机制的数学工具, 包括参与者、策略和效用等几个要素. 参与者是一个博弈中的决策主体, 其目的是通过选择策略以最大化自己的效用. 效用指在一个特定的策略组合下参与者得到的或期望得到的收益, 这是参与者真正关心的东西. 假定每一个参与者的偏好都可以由一个期望效用函数来代表, 则每个参与者的目标是选择自己的策略以最大化其效用. 但是, 个人的最优选择是其他人(即竞争对手或合作者)选择的函数. 博弈论分为非合作和合作博弈. 划分的依据主要在于人们的行为相互作用时, 当事人能否达成一个具有约束力的协议. 如果能, 就是合作博弈; 反之, 就是非合作博弈. 非合作博弈强调的是个人理性和个人最优决策, 即纳什(Nash)均衡; 合作博弈强调的是团体理性(包括效率、公正、公平等)和全局最优决策, 即帕累托(Pareto)最优.

文献[29]中提出一种协作中继网络中资源分配的博弈方案, 在此方案中, 用户采用的是非对称中继模型(中继节点不能是数据的源节点, 只能转发数据), 以卖方市场(供不应求)竞争行为建模, 当网络中存在多个用户竞争同一个中继节点的带宽资源时, 中继节点如何为多个竞争用户分配资源的问题. 利用基于价格机制的非合作博弈理论考虑如何激励中继节点参与协作, 以及如何最大化节点效用的问题.

5.2 非对称协作中继模型

非对称(Asymmetric)有不同的理解含义, 主要包含以下几种.

(1) 在未来无线通信网络(如 WiMAX)是一种混合终端网络, 既有携带方便而且尺寸较小的手机和 PDA 等, 也有功能较强, 尺寸较大的笔记本和游戏机等娱乐设备. 显然, 相对手机来说, 笔记本可以安置更多的天线, 无线接入所消耗的能量占其总能量的比值也小, 此外, 笔记本的处理能力也要比手机强得多, 我们称这种非对称称为节点资源非对称. 因此, 在这种节点资源非对称的网络中, 资源弱势群体如何利用资源强势终端的天线、能量、处理能力等优势, 对基于中继协作的非对称网络来说是个具有挑战性而有意义的课题.

(2) 非对称在不同文献中的含义不一样. 比如, Lameman 将源节点到中继节点和中继节点到目的节点链路不一样称之为非对称, A. Adinoyi 将多中继协作中各中继的位置和信道不一致称之为非对称, 即源节点、中继节点、以及目的节点所处的地理位置和环境可能不同, 导致三者之间的信道也不同. 这些非对称性主要体现在: 首先, 节点的相对位置不一样. 通常中继离目的节点更近, 路径损耗也就更小, 我们称这类非对称称为节点位置非对称. 事实上, 绝大部分中继网络都有这种非对称性; 其次, 节点的环境不一样. 比如在上行链路中, 源节点被建筑物

阻挡而处于阴影当中，而中继没有，或者中继到源节点和目的节点都有直达路径，而源节点和目的节点之间却没有直达路径，因此 SD 到 RD 链路的衰落类型不一样，我们称这类非对称节点环境非对称。非对称的链路环境导致不同的链路性能，如何分析非对称环境下的中继网络性能以及对称的链路性能，如何分析非对称环境下的中继网络性能以及如何充分利用链路之间的差异是非对称网络中的一个重要问题。

(3) 文献文献 4[30]中描述了源节点与中继节点的非对称模型。即这一模型中包含两个用户和一个接入点，一个用户是数据源节点，另一个用户是中继节点，源节点与中继节点的目的地节点就是接入点，在这种情况下，中继节点在不能获利也会帮助中继节点传输信息，因为中继节点本身没有数据节点要传输。由于这两个用户在此模型中的作用不尽相同，因此称此模型为非对称协作中继模型。同理，如果此模型中的两个用户节点的作用是相同的（用户节点既可以是中继节点也可以是源节点），称之为对称协作中继模型。本节所要讲述的是[30]中的非对称协作中继模型。

如图 5.1 所示是非对称协作中继模型。在此模型中，多个用户节点（源节点）和中继节点 r 。

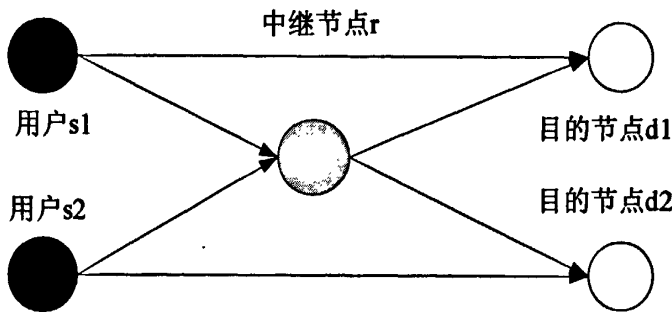


图 5.1 非对称协作中继模型

协作协议为放大再中继 AF (amplify and forward) 协议。设信道是平稳的，信道噪声 N 是相互独立的、均值为 0、方差为 σ^2 的复高斯随机变量， P 为发送功率， G 为信道增益。

由以上协作中继模型看出，两个源节点（用户 s_1 和用户 s_2 ）和一个中继节点 r ，协作中继过程包括以下两个阶段：

阶段一：源节点到目的节点的直接传输。

目的节点 d_i 接收到的信号为 $Y_{s,d} = \sqrt{PG_{s,d}}X + N_{s,d}$ ，直接传输的接收信噪比为

$$\gamma_{s,d} = P_s G_{s,d} / \sigma^2.$$

阶段二：源节点经中继节点到目的节点的中继传输 r ，目的节点 d_i 接收到的信

号分别为

$$\begin{cases} Y_{s,r} = \sqrt{P_s G_{s,r}} X + N_{s,r} \\ Y_{r,d_i} = \sqrt{P_r G_{r,d_i}} X_{r,d_i} + N_{r,d_i} \end{cases} \quad (5-1)$$

其中, $X_{r,d_i} = Y_{s,r} / |G_{s,r}|$ 是中继节点将来自源节点 s_i 的信号进行放大后转发给目的节点 d_i 的、能量归一化的信号。整理后可得中继传输接收信噪比为:

$$\gamma_{s,r,d_i} = \frac{P_s G_{s,r} P_r G_{r,d_i}}{\sigma^2 (P_s G_{s,r} + P_r G_{r,d_i} + \sigma^2)} = \frac{\gamma_{s,r} \gamma_{r,d_i}}{1 + \gamma_{s,r} + \gamma_{r,d_i}} \quad (5-2)$$

协作传输在 AF 协议下的系统接收信噪比为:

$$\gamma_{s,d_i}^{AF} = \gamma_{s,d_i} + \gamma_{s,r,d_i} \quad (5-3)$$

每个节点分配相等的带宽 w (Hz)。设中继节点 r 愿意利用其带宽的 w_i/w ($0 \leq w_i \leq w$) 部分帮助中继源节点 s_i 产生的 w_i/w 部分的数据, 即传输该部分数据将共同占用用户与中继节点 w_i 大小的带宽, 此部分数据采用了协作中继, 故可以获得协作分集增益。而源节点 s_i 剩余的 $(w - w_i)/w$ 部分数据, 将利用用户剩下 $w - w_i$ 大小的带宽进行 s_i 到 d_i 的直接传输, 此部分数据未采用协作中继, 故无法获得协作分集增益。

5.3 中继提供给用户服务方式

本文所讨论的是在通信网络中, 如果处在基站边缘或不在基站覆盖范围内的多个用户需要与基站之间建立通信链路, 即用户与基站之间的通信链路会发生严重的衰落, 致使通信质量将会很差或者直接导致通信链路的的中断, 这时用户就可以通过与中继站的协作来加强或者建立与基站之间的通信链路, 从而完成通信任务; 或者用户可以通过中继站数据的转发到达目的节点, 也可以直接与目的节点通信, 这样获得分集增益。

在 FDMA 网络中, 每个节点分配的带宽一定的情况下, 当多个用户向中继站申请带宽资源的时候, 中继站会采用一定的方式为用户提供带宽资源。在传统网络中, 中继站会采用先到先服务的方法为用户分配资源, 在本文中中继站会使用博弈方案为用户分配资源。

5.3.1 先到先服务方式

在通信网络中, 当多个用户处在基站边缘, 此时用户需要借助中继来传输数

据, 如果此时中继节点很少, 会出现多个用户会向中继站申请带宽资源。

在传统的方式下, 中继站对第一个向其申请资源的用户提供服务, 其次对第二个向其申请资源的用户提供服务, 以此类推。这就是传统中所述的先到先服务的方式。

下面用具体的例子来说明, 先到先服务的工作流程。如图 5.2 所示的用户 S1 首先向中继站申请资源, 用户 S2 申请资源的时刻晚于用户 S1。中继站发现用户 S1 向其申请资源, 它就会分配带宽给用户 S1, 用户 S1 与基站的通信方式如图 5.2 中的实线所示。当中继站完成对用户 S1 的服务后, 用户 S2 才会得到中继站对其所提供的带宽资源, 用户 S2 与基站的通信方式如图 5.2 中的虚线所示。

需要说明的是用户到中继站的通信链路有两条, 一条是用户到目的节点的直达链路, 另一条是通过中继站对用户发送给它的的数据转发给目的节点, 从而用户可获得的分集阶数为“2”。

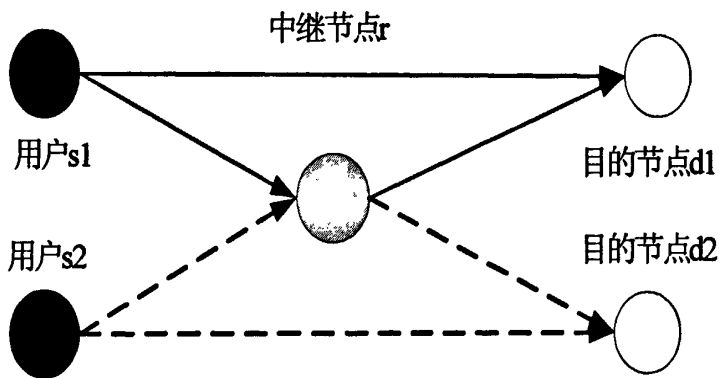


图 5.2 先到先服务的示意图

5.3.2 采用博弈的改进方案

在 5.2 节中所提出的非对称中继模型中, 中继和用户之间采用博弈的方案来分配带宽。用户可以同时申请到带宽资源, 按照 5.2 节所描述的方案进行协作。这里所用的是协作中继博弈 (CRG: Cooperative Relay Game), 该博弈存在先动者和后动者, 后动者根据先动者的策略来选择自己的策略, 即本文所述的动态博弈。在 CRG 中, 中继和用户节点都以最大化自身效益为目标。中继节点作为博弈的先动者, 根据所有用户带宽的总需求设定协作带宽资源的价格; 用户节点作为博弈的后动者, 根据价格来决定其向中继节点购买的带宽份额。

定义 $I = \{1, 2, \dots, N\}$ 为系统中用户节点的集合, 用户 i 的策略为其向中继节点 r 请求的协作带宽的大小 w_i 。参考文献[31], 定义中继节点 r 的定价策略为:

$$c(W) = b \left(\sum_{i=1}^N w_i \right)^\tau \quad (5-4)$$

其中 b 和 τ 是非负常数, $W = \{w_1, w_2, \dots, w_N\}$ 表示所有用户的策略集合, 令 $\tau \geq 1$, 则 $c(W)$ 为凸函数。设 w_{thr} ($0 \leq w_{thr} \leq w$) 为中继节点用于协作用户节点的带宽总量, 则有

$$\sum_{i=1}^N w_i < w_{thr} \quad (5-5)$$

这里提出一种能够最大化中继节点收益的策略: 若所有用户的带宽需求总量超出了中继节点的可用协作带宽 w_{thr} , 则带宽需求最小的用户被拒绝协作, 直至条件 (5-5) 被满足。

使用价格更新函数 (5-4), 协作资源的价格由中继节点外部确定。由于用户节点是对等的, 且对于中继节点来说是匿名的, 因此他们面临着相同的价格 c 。

网络中每个节点都希望以较小的发送功率 p 获得较高的吞吐量 T , 用一个能量效率函数 u (每消耗 1 焦耳能量所能传输的数据比特数) 来表示上述问题的折中 $u = T/p$ bits/s/W (bits/Joule)。设用户在带宽 w 下以速率 R bits/s 进行数据的传输, 则吞吐量可以表示为 $T = R \cdot f(\gamma)$, 其中 $f(\gamma)$ 是一帧成功接收概率的近似函数。又 $R = \eta w$, 设系统的频带利用率 η , 经整理后吞吐量可以表示为 $T = \eta w f(\gamma)$ 。

定义用户 i 在 CRG 中的效用函数为:

$$U_i = \left(T_{s,d_i}(p_i, w - w_i) + T_{s,d_i}^{AF}(p_i, w_i) \right) / p_i - c \cdot w_i, \quad \forall i \in I \quad (5-6)$$

其中 $T_{s,d_i}(p_i, w - w_i) = \eta(w - w_i)f(\gamma_{s,d_i})$ 是用户 i 利用带宽 $w - w_i$ 直接传输所获得的吞吐量, $T_{s,d_i}^{AF}(p_i, w_i) = \eta w_i f(\gamma_{s,d_i}^{AF})$ 是用户 i 在中继节点 r 的协助下占用带宽 w_i 通过协作中继所获得的吞吐量, $c w_i$ 则表示用户 i 对占用中继节点中继带宽 w_i 的支付, c 是当前协作资源的价格。[29] 给出 CRG 的纳什均衡解的存在性证明以及求解方法。

5.4 系统仿真

本章所采用的系统仿真模型如 4.2.1 节所述, 这里不再赘述。

本章所采用的是非对称协作模型。在此模型中我们应用的是两个用户, 一个

中继的场景。

为了仿真基于协作中继博弈带宽分配策略 WiMAX 的性能，我们从 IEEE 802.16e 获得参数。

本章所用的其它参数与 4.4.2 节中的相同。

针对 64Kbps 的业务需求，在给定不同带宽(1.25MHz, 5MHz, 10MHz, 20MHz)的情况下，仿真了基于协作中继博弈带宽分配策略的 WiMAX 的性能和先到先服务的 WiMAX 的性能，并进行了比较分析。

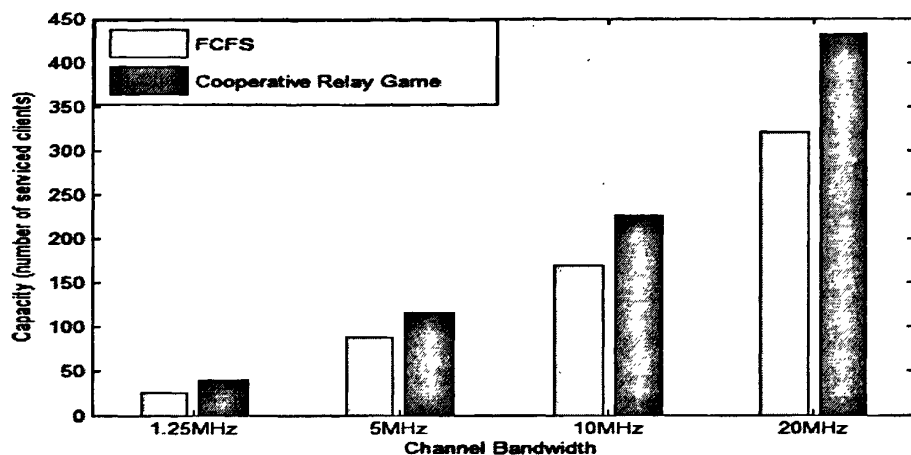


图 5.3 系统容量（用户数目）与带宽之间的关系

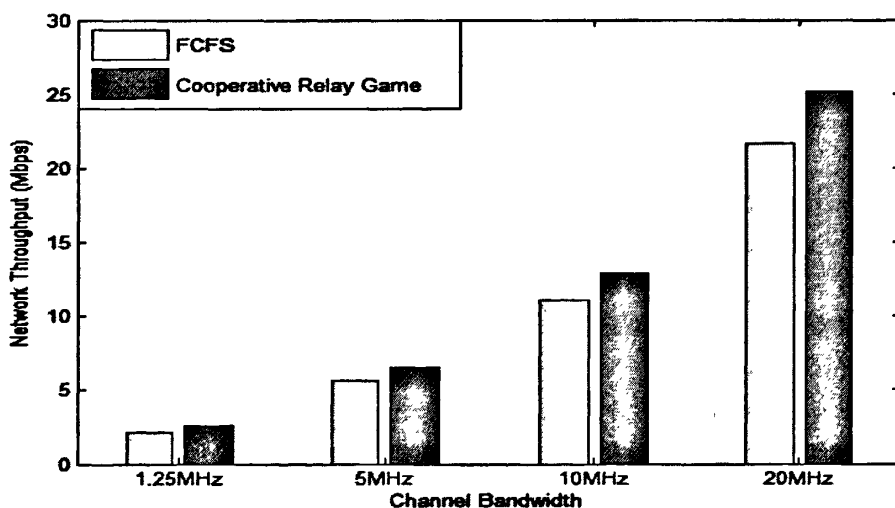


图 5.4 小区平均吞吐量与系统不同带宽之间的关系

图 5.3, 5.4 表示出了系统容量（用户数目）和系统吞吐量随着带宽的增加而不断增加。

由于协作中继博弈方案的引入，有效地激励了中继节点与用户积极参与协作。用户应用此方案获得合理的带宽资源，其部分数据可以通过中继节点的中继转发到达目的节点，此用户获得了协作分集增益，详见 5.2 节。

从图 5.3, 5.4 中可以看出, 基于协作中继博弈带宽分配策略的 WiMAX 的性能(系统容量、吞吐量)优于传统的先到先服务的 WiMAX 的性能。

以下两个仿真图给出了在带宽为 20MHz 的条件下, 对于移动终端不同的业务需求, 如: 语音(64Kbps)、网页浏览(128Kbps)、视频(512Kbps)以及文件下载(1024Kbps)等四种不同的业务模式下的网络性能的比较。

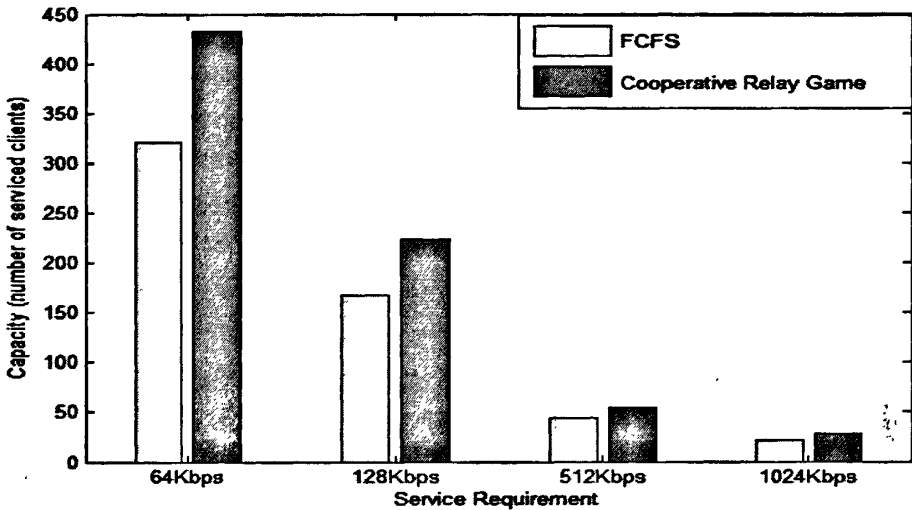


图 5.5 系统容量 (用户数目) 与移动终端的不同业务需求之间的关系

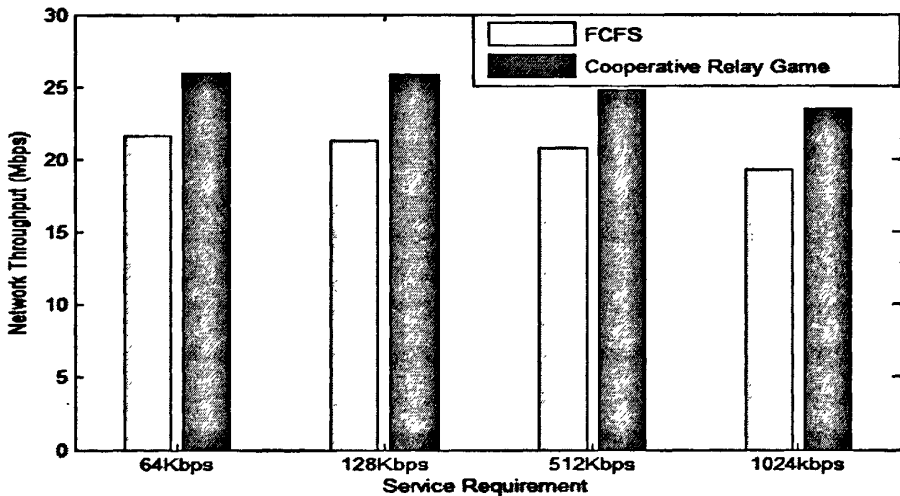


图 5.6 小区平均吞吐量与移动终端的不同业务需求之间的关系

图 5.5, 5.6 表示出了随着终端用户对业务需求申请的不断提高, 每个小区所容纳用户数目和吞吐量随之逐渐减少。

当处在基站边缘或者走出基站范围的多个用户需要寻求中继的协助来完成与目的节点的通信, 此时, 如果只有少数的中继节点, 就是出现多个终端用户节点竞争一个中继节点的场景, 本系统中, 考虑是两个终端用户竞争同一个中继节点的场景, 利用博弈的方案来达到最大化利用资源的目的。

从图中可以看出,基于协作中继博弈的 PMP/Mesh WiMAX 的性能(系统容量、吞吐量)优于先到先服务的 WiMAX。

5.5 本章小结

本章首先介绍了博弈的基本概念和分类,然后描述了非对称协作中继模型。将协作中继博弈的方法引入到 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 中,中继节点和用户之间应用了协作中继博弈的方案实现了对中继节点的带宽资源的分配。最后对基于协作中继博弈的方法的网络性能进行了仿真,结果表明基于协作中继博弈与传统的先到先服务的方法相比较,具有比较好的网络性能。

第六章 总结和展望

无线 Mesh 网络技术和协作通信技术是近年来受到通信业界高度重视的两种技术。

在本文中详细介绍了无线 Mesh 网络技术。无线 Mesh 网络技术是一种能够让移动用户终端之间建立直接通信链路的技术。处在网络中的移动终端具有一定的路由选择功能,每个移动终端能和其相邻的终端进行直接通信,将这一项技术应用到现有的基础网络中是未来通信发展的方向。本文还描述了无线 Mesh 网络的三种结构类型(骨干网 Mesh 结构、客户端 Mesh 结构和混合结构)以及 Mesh 模式的物理层的接入机制和 MAC 层的帧结构。本文第三章介绍了协作通信技术。协作通信技术是一种依靠终端间相互辅助来完成信息传输的技术。也就是说,终端借助其合作伙伴的天线,与自身天线构成多天线发射系统,并通过模仿 MIMO 技术来获得空间分集增益。本文描述了协作通信的不同模型,比如:单中继双跳协作模型,多中继多跳协作模型等。空时码是对协作通信网络中的一种重要的编码形式,本文做了简单的介绍。

为了在无线移动通信网络中同时应用无线 Mesh 网络技术和协作通信技术,本文首先提出了 PMP/Mesh 混合网络结构模型,并且在这一模型中引入了终端间的协作技术,提出了一种基于协作的 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 的帧结构。

最后,用 Matlab 搭建了仿真平台,完成了基于协作的 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 吞吐量以及容量等性能的仿真,并将其与 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 和 PMP WiMAX 两种组网模式的 WiMAX 性能进行了对比。仿真结果表明,基于协作的 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 性能得到了进一步的提高。

尽管本文所讨论的基于协作的 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 在性能上比 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 和 PMP WiMAX 得到一定的改善,但是仍然存在一些问题需要进一步的研究。

本文还将协作中继博弈的方法引入到 PMP/Mesh 混合网络的 WiMAX 中,中继节点和用户之间应用了协作中继博弈的方案实现了对中继节点的带宽资源的分配。仿真表明,基于协作中继博弈的方法能提高网络性能。

本文采用的是简单的全向天线模型,如果能采用较好的天线模型,这将对系统的性能有进一步的提高,所以,良好的天线模型的引入,也是以后需要做的工作。

致谢

随着论文工作逐渐步入尾声，在西安电子科技大学的硕士学习阶段的生活也即将结束，在此我由衷地感谢所有关心、帮助、支持我的人。

首先我深深地感谢我的导师赵力强教授。我的整个硕士阶段的研究工作中自始至终都得到了赵老师的悉心指导和帮助。赵老师渊博的知识、严谨的治学态度、缜密的思维方式、忘我的工作作风和正直谦和的为师风范深深地感染了我，是我学习的楷模。还要感谢张海林教授，张老师平易敬人、和蔼可亲，每次在实验室见到他，都会给我们真诚的教导。感谢在我迷茫的时候，张老师对我的指点。非常感谢两位老师为我创造良好的学术氛围，激发了我的创新意识和进取精神，为我顺利完成学业提供了条件。

感谢我的家人。我将此文献给含辛茹苦养育我的父亲和母亲。感谢姥姥在我年幼时对我悉心的照顾，我也感谢我的二姨和二姨夫在初中高中的六年中，不辞劳苦的照顾和爱护我。我在此感谢他们。

感谢刘龙伟老师、丛犁师姐等无线通信实验室的老师们和师兄师姐们！感谢他们过去两年中给予我的指导和关怀。

感谢刘飞霞、赵燕、白继鹏、郜志邦、赵国强、靳营，王凯、马战胜、袁建党等两年多的时间里对我学习和生活上的帮助，并给我生活留下许多美好的回忆。

感谢翁珠恩、邱婷婷、孙发勇、明彩叶、张妙、柴巧林、崔琳、姚宇等好朋友对我的关心和爱护。感谢我的知心朋友在我最委屈和无助的时候，给我中肯的意见和无私的帮助和关怀，我很感动。

最后，感谢为审阅本文而付出辛勤劳动的专家学者们。

参考文献

- [1] I. F. Akyildiz, X. Wang. A survey on wireless mesh network. *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 9, 2005. pp.23-30.
- [2] H.W. Bernhard, M. Stefan, B. Lars. *IEEE 802 wireless systems: protocols, multi-hop mesh/relaying, performance and spectrum coexistence*. John Wiley & Sons, Ltd, 2006.
- [3] P. Gupta, P. R. Kumar. the capacity of wireless networks. *Information Theory, IEEE Transactions*, vol 46, 2000. pp.388-404.
- [4] 刘冕, 彭木根, 王文博. 基于 IEEE 802.16 标准的 Mesh 机制研究. *数据通信*, 2005.
- [5] Simone Redana, Matthias Lott. Performance Analysis of IEEE 802.16a in Mesh Mode, *International Conference on Computer Science and Informatics*, 2005.
- [6] I.F.Akyildiz, J. McNaire, J.S.M.Ho, H.Uzunalioglu, W.Wang. Mobility management in next generation wireless systems, *IEEE Proceedings*, 1993, pp: 1347-1385.
- [7] E. C. VanderMeulen. Transmission of information in a T-terminal discrete memoryless channel. PhD thesis, Dept of Statistics, University of California, Berkeley. 1968.
- [8] T. M. Cover, A. E. Gamal. Capacity theorems for the relay channel. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1979. pp:572-584.
- [9] E. C. VanderMeulen. A survey of multi-way channels in information theory, *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1977, pp:1-37.
- [10] Sendonaris A, Erkip E, and Aazhang B. User cooperation diversity. Part I. System description. *IEEE Transactions on Communications*, 2003 51(11): 1927-1938.
- [11] Sendonaris A, Erkip E, and Aazhang B. User cooperation diversity. Part II. System description. *IEEE Transactions on Communications*, 2003 51(11): 1939-1948
- [12] Laneman J N, Womell G W. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 2003, 49(10): 2415-2425.
- [13] Laneman J N, Tse D. N. C, Womell G W. Cooperative diversity in wireless

- networks: Efficient protocols and outage behavior. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [14] T. E. Hunter, A. Nosratinia. Performance analysis of coded cooperation diversity, *IEEE International Conference on Communication*, 2003, pp: 2688-2692.
- [15] T. E. Hunter, A. Nosratinia. Diversity through Coded Cooperation, *IEEE Trans. on Wireless Communication*, vol. 5, no. 2, Feb. 2006, pp: 283-289.
- [16] 徐峰. 无线网络中协作通信系统的性能分析. 大连海事大学博士学位论文. 2009.
- [17] Dohler M. Virtual Antenna Arrays. Ph.D. dissertation, King'S College, London, U.K. 2003.
- [18] Dohler M, Lefranc E, Aghvami H. Space-time block codes for virtual antenna arrays. *Conference on PIMRC*, Lisbon, Portugal, 2002.
- [19] Arogyaswami Paulraj, Rohit Nabar, Dhanjay Gore 著. 空时无线通信导论. 刘威鑫译. 北京: 清华大学出版社. 2007.
- [20] G. J. Foschini, Layered space-time architecture for wireless communications in a fading environment when using multi-element antennas, *Bell Labs Tech. J.*, 1996.
- [21] Alamouti S.M., A simple transmit diversity technique for wireless communications, *IEEE Journal of Selected Areas on Communications*, 1998; 16(8): 1451-1458.
- [22] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A.R. Calderbank. Space-time block codes from orthogonal designs. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 45(5), 1456, 1999.
- [23] Mohinder J., *Space-time codes and MIMO systems*, Artech House, 2004.
- [24] 于宏毅等. 无线移动自组织网. 北京: 人民邮电出版社. 2005.
- [25] 张新. 面向临近空间的通信的 PMP/Mesh 混合网络性能研究. 西安电子科技大学硕士学位论文. 2010.
- [26] J.G. Andrews, A. Ghosh, R. Muhamed. *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*, Pearson Education, Inc, 2007.
- [27] F. Gordejuela-Sanchez, D. Lopez-Perez, J. Zhang, and L. Zhao. Efficient Mobile WiMAX Capacity Estimations in a Multihop Environment, *IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*, 19-21 November 2008, Guangzhou, China, pp: 1640-1646.
- [28] 施锡栓. 博弈论. 上海: 上海财经大学出版社. 2001. pp: 5-57.

-
- [29] L Cong, L Zhao, K Yang, H Zhang, G Zhang. A Stackelberg Game for Resource Allocation in Multiuser Cooperative Transmission Networks. *Wirel. Commun. Mob. Comput.* 2010.
- [30] Zhang Z Y, et al. A cooperation strategy based on Nash bargaining solution in cooperative relay networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(4):2570-2577.
- [31] Niyato D, Hossain E. Competitive spectrum sharing in cognitive radio networks: A dynamic game approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(7): 2651-2660.

