

学校代码: 10255

学号: 2121056

异构无线网络区分业务的垂直切换及分组调度算法研究

VERTICAL HANDOFF AND SCHEDULING ALGORITHMS
FOR SERVICES DIFFERENTIATION IN
HETEROGENEOUS WIRELESS NETWORKS

学科专业: 信息与通信工程

论文作者: 余海翔

指导老师: 陈 雯

答辩日期: 2015 年 1 月 8 日

东华大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

东华大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权东华大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☐。

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

异构无线网络区分业务的垂直切换及分组调度算法研究

摘 要

未来的移动通信系统需要支持更高的传输速率, 容纳更多的用户, 并且保障多种业务的服务质量(Quality of Service, QoS)。在多业务并存的异构无线网络中, 一个高效合理的垂直切换策略, 以及切换后异构资源的调整和分配对于异构无线网络资源管理技术至关重要, 它决定了网络资源利用率和用户满意度等多方面的性能。由于不同业务自身的特点和不同的 QoS 要求, 在设计垂直切换和调度算法时考虑的因素也有所不同。因此在异构无线网络中, 区分业务类型的垂直切换以及分组调度算法研究具有非常重要的理论意义和实用价值。

异构网络支持多业务, 首先需要考虑不同业务在切换中的优先级问题。而如何根据实时、非实时业务的 QoS 指标来进行切换判决, 降低掉话率, 减少切换次数, 避免非实时业务占用实时业务带宽资源, 提升网络资源的利用率成为无线资源管理的难点。针对目前异构无线网络垂直切换算法没有区分业务而导致掉话率变大等问题, 论文提出一种基于业务类型的垂直切换算法(Vertical Handoff Algorithm Based On the Type of Business, VHA-TB)。本文首先根据信号强度进行预判决, 减少切换判决的开销; 然后利用对切换指标及切换网络的满意度计算出垂直切换判决值; 接着对不同业务类型引入不同的切换时延门限阈值, 保证无缝切换。该算法不仅支持多业务, 而且保证了公平性。

目前研究的一些分组调度算法只适合实时业务或者非实时业务，虽然提高了对实时业务和非实时业务调度的有效性，但是牺牲了用户的公平性。在异构无线网络中，调度算法必须根据不同用户的 QoS 要求，在有效性和公平性二者之间取得折中。目前对异构无线网络中混合业务分组调度算法研究较少，因此本文提出了自适应混合业务分组调度算法（A New Adaptive Hybrid-traffic, NAH）。首先，我们建立了异构无线网络混合业务分组调度模型，并设计了业务分组队列的管理方法。其次，我们提出混合业务分组调度策略，该调度策略对缓冲区队列的分组时延和丢弃概率建立效用函数，并分别赋予权重因子。同时根据效用函数的最大值来决定调度优先级。本文还根据业务类型适度调整权重因子，使不同业务实际获得的 QoS 水平与对应的 QoS 需求成比例，实现调度策略的自适应调节。最后，我们根据信道资源状况来控制用户业务的接入或切换。

论文通过仿真软件 NS-2 来模拟多模终端节点，并搭建异构网络资源管理平台来测试上述算法的性能。仿真结果表明，本文提出的 VHA-TB 算法比现有的 VHA-FC 算法在掉话率、丢包率和切换次数上都有所减小；本文提出的 NAH 算法比现有的 M-LWDF 算法，PF 算法和 TF-RNS 算法在时延、丢包率及公平性能上有所优化，但是吞吐量有所降低。在异构网络大量业务数据的情况下，提高业务 QoS 来满足用户需求比提高吞吐量导致业务 QoS 下降更重要。

关键词：异构无线网络，资源管理，区分业务，垂直切换，分组调度

VERTICAL HANDOFF AND SCHEDULING ALGORITHMS FOR SERVICES DIFFERENTIATION IN HETEROGENEOUS WIRELESS NETWORKS

ABSTRACT

Future mobile communication systems need to support higher transmission rate, accommodate more users, and protect a variety of business service quality. In heterogeneous wireless networks that multi-services coexist, an efficient and rational vertical handoff strategy, and distribution of heterogeneous resources are essential for wireless network resource management, which determine the performance of network resource utilization and user satisfaction. Due to different business characteristics and different QoS requirements, factors in the design of the algorithms are different considerations, vertical handoff and packet scheduling algorithms that distinguish the types of business have a very important theoretical and practical value in heterogeneous wireless networks.

Heterogeneous networks support multi-services, and we need to consider different service priorities in handover. At the same time, it becomes difficulties that lower vertical handoff call dropping probability, reduce the number of switches, avoid real-time service resources being occupied by non-real-time service bandwidth, and improve the utilization of network resources, when making handoff decisions based on QoS performance indicators of real-time and non-real-time services. Aiming at high call dropping probability issues that a lot of current vertical handoff algorithms do not differentiate business types, this paper presents a Vertical Handoff Algorithm Based On the Type of Business (VHA-TB). Firstly, we reduce the overheads of handoff decisions by the pre-judgment based on signal strength. Secondly, we calculate the vertical handoff decision value using satisfaction degree of QoS index and target network. Thirdly, we set different traffic handoff latency thresholds for real-time traffic and non-real-time traffic to ensure seamless handoff. The algorithm is suitable for different services, and ensures fairness.

Besides, current scheduling algorithms are only suitable for real-time services or non-real-time services. For improving the effectiveness of real-time and non-real-time traffic scheduling, it is at the expense of the users' fairness. In heterogeneous wireless networks, the scheduling algorithm must obtain a compromise between efficiency and fairness based on the QoS

requirements of different users. Current researches do not consider hybrid traffics. Therefore, this paper studies adaptive hybrid-traffic packet scheduling algorithms and proposes a New Adaptive Hybrid-traffic algorithm (NAH). Firstly, we create a model for hybrid-traffic packet scheduling algorithm, and design traffic packet queue management methods. Secondly, we propose a hybrid-traffic packet scheduling strategy that builds a utility function based on packet delay and packet loss rate of buffer queue, and respectively assigns weighting factors. Thirdly, we adjust the weighting factors appropriately according to the type of traffic, and make different QoS services actually obtained that is proportional to corresponding QoS requirements. Then, we determine the scheduling priorities according to the maximum utility function. Finally, we control user access or handoff according to the channel resource status.

Finally, the paper designs multimode nodes and builds heterogeneous network performance simulation platform by NS-2. Simulation results show that the proposed VHA-TB algorithm is better than VHA-FC algorithm on reducing dropping rate, packet loss rates and handoff times. Compared to existing M-LWDF algorithm, PF algorithm and TF-RNS algorithm, NAH algorithm is optimized on the delay, packet loss rate and fairness at the expense of throughput. But improving QoS to meet the requirements of users is more important than increasing throughput at the expense of users' QoS.

Author Name: Haixiang Yu (Information and Communication Engineering)

Supervised by Associate Professor Wen Chen

KEYWORDS: Heterogeneous Wireless Networks, Resource Management, Differentiated Services, Vertical Handoff, Packet Scheduling

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 异构网络融合的研究现状	2
1.2.2 垂直切换的研究现状	3
1.2.3 分组调度的研究现状	4
1.2.4 存在的问题	5
1.3 论文的主要工作	6
1.4 论文组织结构	6
第 2 章 异构无线网络资源管理及相关算法	9
2.1 引言	9
2.2 异构无线网络及其资源管理	9
2.2.1 异构无线网络概述及特点	9
2.2.2 异构无线网络资源管理	11
2.3 垂直切换算法	12
2.3.1 垂直切换与水平切换	12
2.3.2 切换原因及控制方式	14
2.3.3 垂直切换过程	15
2.3.4 现有算法总结	16
2.4 业务分组调度算法	17
2.4.1 分组调度原因	17
2.4.2 分组调度算法分类	18
2.4.3 混合业务调度算法	19
2.4.4 现有算法总结	20
2.5 本章小结	21
第 3 章 基于业务类型的垂直切换算法	23
3.1 引言	23
3.2 业务类型	23
3.3 系统模型	24
3.4 切换判决因素	25

3.5 切换判决策略	26
3.6 垂直切换算法流程.....	28
3.7 本章小结	30
第 4 章 自适应的混合业务分组调度算法	31
4.1 引言	31
4.2 系统模型	31
4.2.1 网络系统模型	31
4.2.2 混合业务调度系统模型	32
4.3 业务分组队列管理方法	33
4.4 混合业务分组调度策略	35
4.5 调度策略自适应调节机制	36
4.6 信道资源分配策略	38
4.7 分组调度算法流程	40
4.8 本章小结	42
第 5 章 仿真与分析	43
5.1 引言	43
5.2 仿真平台概述	43
5.3 异构无线网络环境搭建	45
5.3.1 无线网络协议扩展包选择	45
5.3.2 多模节点设计	46
5.4 基于业务类型的垂直切换算法仿真	50
5.4.1 仿真场景设置	50
5.4.2 性能评价指标	51
5.4.3 结果分析	51
5.5 自适应的混合业务分组调度算法仿真	55
5.5.1 仿真场景设置	55
5.5.2 性能评价指标	56
5.5.3 结果分析	57
5.6 本章小结	61
第 6 章 总结与展望	63
6.1 全文总结	63
6.2 展望	63
参考文献	65
攻读硕士学位期间主要研究成果和参与的项目	71
致谢	73

第 1 章 绪论

随着经济和社会的飞速发展，有线技术和无线技术不断进步。信息的传输和交互成为人类物质生活及精神生活中不可缺少的部分。快速发展的通信技术对无线网络传输能力和质量不断提高要求，对其工作模式和业务应用也提出新的要求。随着第四代移动通信网络技术在世界范围内的成功商用，众多研究学者意识到未来的无线网络将是由多种无线网络技术组成并互相融合而成的异构无线网络（Heterogeneous Wireless Network, HWN），该网络能够满足用户对多种服务质量的要求。

1.1 课题研究背景与意义

从 20 世纪 70 年代起，人们的生活方式随着移动通信技术的迅猛发展而发生巨大的变化。随着人们对信息通信需求的扩张，笔记本、智能手机、传感器等各类终端业务变得多样化，包括语音、视频、网页浏览等，对无线网络带宽追求更高，QoS 要求也越来越高。网络模式变得越来越复杂，不再限制于一种网络。2G、3G、4G 等移动通信网，还有热点部署的无线局域网（WLAN）以及提供设备之间短距离无线传输的超宽（UWB）、蓝牙（Bluetooth）、Zigbee 等多种网络技术构成 HWN，其中多种无线网络技术相互融合，相互共存与补充，满足人们对信息服务多样化的需求。移动通信发展历程如图 1.1 所示。

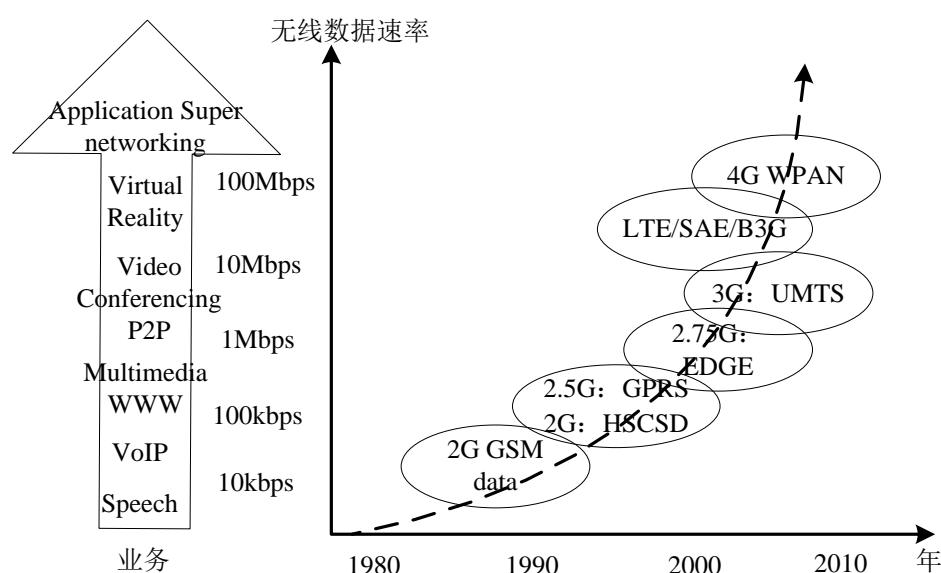


图 1.1 移动通信发展历程

从图中可看出，随着时间增长，网络种类和业务种类变得多样化。人们对通信的要求与日俱增，目前 2G 通信系统提供的服务已经不能满足人们业务多样化

的需求, 4G 网络等新型通信技术支持更多新的业务, 从而满足人们的多样化需求。随着无线多模终端的广泛应用, 终端用户需要多种无线接入技术执行多个任务。当用户密集在同一种网络环境下, 单一制式网络无法满足密集用户的高速传输业务需求。因而, 多网络协作通信、协同工作成为解决问题的最有效途径。下一代网络融合多种无线接入技术构成 HWN, 各种网络的业务能力和技术特性互补, 但是又存在差异。那么解决该问题的合理途径就是在异构融合网络架构上提供一种统一的无线资源管理机制来整合当前的各种网络资源, 保证无线网络用户连续性的无缝服务^[1]。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 异构网络融合的研究现状

在各种通信研究中, HWN 是一个热点问题。LTE 等新型通信技术快速演进和发展, 促使复杂的异构性成为未来通信网络最典型的特征。另外, 移动终端也将会变得异构性, 支持 2G、3G 以及 4G 网络的各种空中接口标准。随着 WLAN 的接入服务, 整个通信网络系统将呈现四网融合的姿态。

针对异构网络融合的关键技术, 国内外的一些研究机构和项目组织等进行了研究。异构网络领域的研究从 IST 的框架结构 FP5(the five Framework Programmers)开始(1998-2002), WINE、WIND-FLEX、DRIVE、TRUST、SCOUT 等^[2]是该阶段的代表项目。这些项目主要针对两点: 第一, 在重构框架下, 软件无线电体系的联合无线资源管理; 第二, HWN 资源的自动管理控制技术。研究发展到 FP6 IST(2002-2006), 欧盟开始研究 HWN 的完整构建和整合。AN(Ambient Network)^[3], WINNER(Wireless World Initiative New Radio)^[4]是该阶段的主要项目。其中 AN 项目从多方面研究网络融合问题, 包括不同接入网的 QoS、移动性、安全和多播等能力方面, 为目前的异构网络共存问题提供了一种网络融合解决方法。HWN 研究典型实例为 3GPP 和 WLAN 融合网络, 其中 Daidalos^[5]项目为欧洲启动的代表性项目, 它主要是将现有的无线技术和 3G 移动通信技术融合起来, 以用户为中心, 综合管理。贝尔实验室提出了 CDMA2000 与 WLAN 的异构网络融合方案^[6]。Milind M.Buddhikot 等分析了这两种网络的特征, 采用了松耦合的模型结构实现融合。

异构网络的融合方案虽然已研究了很多关键技术, 但是由于异构网络规模的庞大复杂, 用户业务种类多样化, 业务数据繁多, 很多问题还需要进一步解决。对于异构网络融合关键技术, 国内外的研究主要集中在网络互联、资源管理和端到端 QoS 等热点问题。具体情况如下:

(1) 异构无线接入网络互联

要实现不同网络互联, 需要设计网络融合模型。针对不同网络各自结构、协议等异构性特征, 设计转换机制来解决不同网络的兼容性, 达到融合目的。如 CDMA2000、WCDMA、GPRS 与 WLAN 之间的融合, WIMAX 与 WLAN 以及 WIMAX 与 3G 等异构网络融合已经有一些研究成果。

(2) 异构无线网络资源管理

一个合理的网络融合模型需要设计一个高效的无线资源管理系统, 对无线资源进行合理公平地配置, 提高多种业务的传输质量。它是未来通信系统研究的主要方向。

(3) 异构无线网络端到端的 QoS 研究

目前端到端的 QoS 研究较多的是同构网络中的 QoS, 而异构网络端到端 QoS 研究较少。QoS 研究是提高用户满意度的最佳途径。

另外, 利用软件无线电思想实现多模终端的可配置也是异构无线通信领域研究重点。因为很多提供商和运营商需要管控各自相关的网络及应用业务, 所以对各种网络的鉴权、计费、认证及安全也是当前的研究热点。

以上异构网络融合关键技术, 无线资源管理(Radio Resource Management, RRM)是核心问题, 也是研究的热点领域。接入控制^{[7][8]}、资源分配^{[9][10]}、移动性管理^{[11][12]}、分组调度^{[13][14]}、负载均衡^{[15][16]}以及多流传输^[17]等技术是传统意义上的无线资源管理。在 HWN 环境下, 不同网络具有各自的特点, 不同用户终端属性和业务属性也不尽相同。对于不同的场景, 无线资源管理技术必须考虑网络特点、用户终端属性和业务属性的差异, 实现不同的优化目标, 采取更为复杂的优化模型^[18]。在新的复杂环境中, 由于传统的无线资源管理技术已经无法满足网络需求和用户需求, 因此我们需要针对实际复杂问题研究实用而高效的无线资源管理技术方案来完善传统无线资源管理技术的不足。

1.2.2 垂直切换的研究现状

目前为止, 对 HWN 垂直切换的研究主要分为以下几类情况:

基于接受信号强度的垂直切换算法。有学者根据异构网络接收信号的相对强度作为切换判决因素^{[19][20]}。该算法的主要判决依据就是信号强度。但是实际状况下, 不同网络的带宽、延迟等因素不相同。因此, 单一因素信号强度不能完全来表征网络性能, 容易导致判决结果不够准确, 不能满足切换要求。我们还需要综合考虑网络的可用带宽、网络费用、切换时延以及用户偏好等多个因素。

代价函数策略的垂直切换算法。Helen J.Wang^[21]等人提出了一种策略驱动的垂直切换算法, 该算法用一个代价函数表示用户在某个网络中的总收益。常见代价函数有 SAW, TOPSIS, GRA 等^[22], 它们主要用来评价网络性能。可接入网

络的总体性能可以通过计算多个参量的代价函数来反应。但是代价函数不能满足对业务实时性要求较高的移动终端。

基于多属性决策的垂直切换算法。多属性决策也称有限方案多目标决策，是指网络端、终端用户或用户辅助网络端共同决策等一些决策者为了用户选择最优接入网，对信号强度、带宽、网络费用、功耗等多个属性综合考虑，然后对判决值进行排序，选择最优方案。在异构网络中，多属性决策方法常见的有简单加权法、乘法指数加权法、层次分析法和灰度关联法等^[23]。

上下文感知判决策略的垂直切换算法。上下文感知是对移动终端的位置、网络的服务质量、网络覆盖范围等背景信息，然后采取智能判决。但是实际情况下，很难获取这些信息，因此上下文感知判决策略实现难度很大^{[24][25]}。

基于模糊逻辑的垂直切换算法。模糊逻辑法用于处理现实中时变的、不确定的信息，对多个参数进行综合分析决策，解决网络环境中不确定因素的问题。L.A.Zadeh 教授^[26]在 1965 年探讨人类主观过程中定化处理的方法时提出了模糊理论，并且引出了隶属函数的概念。其核心思想是通过隶属函数，对垂直切换中需要考虑的不确定属性因素进行模糊化处理，得到具体数值的量化，然后进行比较。基于模糊逻辑的垂直判决算法是解决 HWN 环境下的垂直切换决策问题的一个有效方法。

基于神经网络的垂直切换算法。神经网络和模糊逻辑理论的重大区别就在于是否有自主学习能力。神经网络具备自主学习能力，能够对信息进行高度概括和联想记忆，通过自主学习输入参量所包含的知识。人工神经网络主要是一种抽象、简化与模拟人的智能的一种方法。文献^[27]结合模糊理论和神经网络的优点，提出了一种基于模糊神经网络的垂直切换方法，具有模糊推理功能和逻辑意义。

1.2.3 分组调度的研究现状

目前为止，国内外学者对于分组调度算法的研究主要情况如下：

对于实时业务分组调度，文献^[28]中提出了 MPF（Modified Proportional Fair）算法，该算法改进了经典的比例公平算法。此外，文献^{[29][30]}中提出了 M-LWDF 和 EXP 两种算法，可以将吞吐量提高到较理想的程度。文献^{[31][32]}为了验证 M-LWDF 和 EXP 两种算法的正确性，通过仿真发现，M-LWDF 和 EXP 算法同时考虑每个分组的等待时间、时间公平性、机会公平性以及用户的信道质量等多种因素，可以保证更小的分组传输时延。文献^{[33][34]}研究发现 M-LWDF 和 EXP 算法性能都与参数 α_i 密切相关。Khattab 发现仅当 λ_i 很小而且 D_i 很大时，两种算法表现出来的性能才明显好于其它算法。Gutierrez 发现，对时延要求较高的用户在 M-LWDF 和 EXP 算法中的 α_i 取值较大，导致大部分服务时间被实时用户占用，非实时用

户获得较小的服务时间，不能保障公平性。在调度算法的研究中，上面提出的算法以及后来的改进算法，实际上都只适合实时业务的调度。

对于非实时业务分组调度，文献^[35]提出的 MRR (Minimum Rate Request) 调度算法满足了用户最小速率要求，而且使系统公平性和效率达到最大化。文献^[36]发现 MRR 算法仅仅考虑的是用户间的长期速率公平问题，于是在 MRR 调度算法中加入了与用户归一化吞吐量的方差成反比的公平系数，同时将所有用户归一化吞吐量的均值与系统的最大吞吐量的比值表示为效用函数。文献^[37]提出了 FRS (Fair Resource Scheduling) 算法，具有最小归一化发送速率的用户只选择具有利用效率最大的子载波，这样可以确保用户之间的公平性，提高系统吞吐量。但是该算法未考虑系统的带宽利用率问题。文献^[38]为了降低信道估计的反馈量和计算复杂度，在 FRS 算法的基础上提供了功率分配算法和子载波分配算法。文献^[39]改进了 GPS (Generalized Processor Sharing) 调度算法^[40]，该算法根据权重公平，对所有子载波进行分配，确保优先级最高的用户选择信道条件最好的子信道，保证了用户公平性和最大吞吐量。文献^[41]提出了 IFS 算法 (Instantaneous Fair Scheduling)，该算法提供子信道分配机制，子信道通过一次循环就被分配给最需要这个信道的用户，避免信道条件好的用户独自拥有子信道。文献^[35]到文献^[37]提出的算法只保证了用户短期的公平性，但是不能保证所有用户在每个调度周期内都尽量公平地分享无线资源。文献^[38]给出的调度算法更公平，文献^[39]到文献^[41]更注重子载波调度和功率分配的联合优化。以上算法适合非实时用户业务分组调度。

1.2.4 存在的问题

目前研究的一些垂直切换算法较多的考虑单一因素、多属性等，异构网络支持的是多业务，我们需要考虑不同业务在切换中的优先级问题。如何根据实时、非实时业务的 QoS 性能指标来选择相应的切换策略，减少切换次数，降低掉话率，避免非实时业务占用实时业务带宽资源，提升网络有限资源的利用率成为无线资源管理的难点。

此外，目前大多数的垂直切换算法主要是为了满足用户的个性化需求，如带宽、费用成本，没有考虑到系统的性能，以及切换前后对 HWN 资源的调整和配置，此时需要一个分组调度方法。相关文献提出的分组调度算法并没有提供公平性保障，或者只支持实时或非实时业务，或者算法复杂度很高，或者不支持不同 QoS 要求的多种混合业务，或者无线信道利用率较低。这些算法大都没有考虑到实际异构网络工程应用，因为多种网络的不同业务往往同时存在。可见，到目前为止还不存在一个适合 HWN 混合业务分组调度的统一机制。

1.3 论文的主要工作

无线资源管理机制是 HWN 保证用户终端 QoS 的重要途径,也是一个具有重要意义的课题。无线资源管理涉及的内容较广泛,本文着重从基于业务类型的垂直切换和混合业务分组调度两个方面对异构无线融合网络无线资源管理关键技术进行了研究与分析。本文主要的研究工作如下:

(1) 在分析现有典型垂直切换算法不足的基础上,针对目前异构无线融合网络的垂直切换算法在切换判决阶段的判决策略及切换执行阶段的切换时延问题上没有区分业务类型,导致不必要切换,掉话率高,传输质量差等问题,本文研究并提出了一个基于业务类型的垂直切换算法 VHA-TB。该算法根据实时业务和非实时业务对 QoS 指标要求不同,分别设置对应的 QoS 指标权重因子;利用对切换指标及切换网络的满意度计算出垂直切换判决值,从而区分不同业务类型对网络的切换选择;同时针对实时业务和非实时业务,引入不同的切换时延门限阈值,保证无缝切换,降低掉话率。

(2) 在分析现有分组调度算法不足的基础上,针对目前分组调度算法不适合异构无线网络混合业务调度,不能保证公平性,本文提出了自适应的混合业务分组调度算法 NAH,适合实时、非实时的混合业务。在该分组调度方案中,本文设计了 HWN 系统调度模型;然后基于缓冲区队列管理方法提出了 QoS 保障的 NAH 调度算法;设计出随着资源变化动态调整调度策略的机制,可以根据网络性能差异适度调整权重因子,使不同业务实际 QoS 水平与对应 QoS 需求成比例,适合业务处理能力不同的 HWN 系统;最后利用信道资源分配情况来控制业务接入或切换请求。

(3) 搭建 NS-2 网络性能仿真平台,设计多模节点,对提出的基于业务类型的垂直切换算法和自适应的混合业务分组调度算法进行性能仿真与分析。

1.4 论文组织结构

本文的主要结构安排如下:

第一章:绪论。首先介绍了课题研究的背景与意义,简要阐述了 HWN 融合研究的热点问题,及无线网络资源管理中垂直切换及分组调度的研究现状,最后对本文组织结构安排进行了介绍。

第二章:异构无线网络资源管理及相关算法。首先对异构无线融合网络架构和互联场景进行了介绍,然后分析了异构网络协议栈模型,重点介绍了无线资源管理研究方向,最后对典型垂直切换和分组调度两种无线资源管理关键技术进行了阐述,并分析两者的局限性。

第三章：基于业务类型的垂直切换算法。首先根据业务对时延的敏感程度进行分类，然后建立垂直切换的系统模型，接着结合业务类型对 QoS 指标的需求，针对实时业务和非实时业务引入垂直切换判决值及切换时延判决门限阈值。

第四章：自适应的混合业务分组调度算法。首先建立系统模型，然后设计队列更新方法，提出混合业务调度策略，并提出了自适应调节机制实现 QoS 策略配置，最后根据调度优先级对信道资源进行分配。

第五章：仿真与分析。首先概述 NS2 仿真软件，然后搭建 HWN 环境，设计多模节点。最后对本文提出的算法进行仿真场景设置，对仿真结果进行比较和分析。

第六章：总结与展望。对本文的研究工作进行总结，指出本文算法中的一些不足之处和需要改进的地方，并对下一步工作进行展望。

本论文结构如下图 1.2 所示：

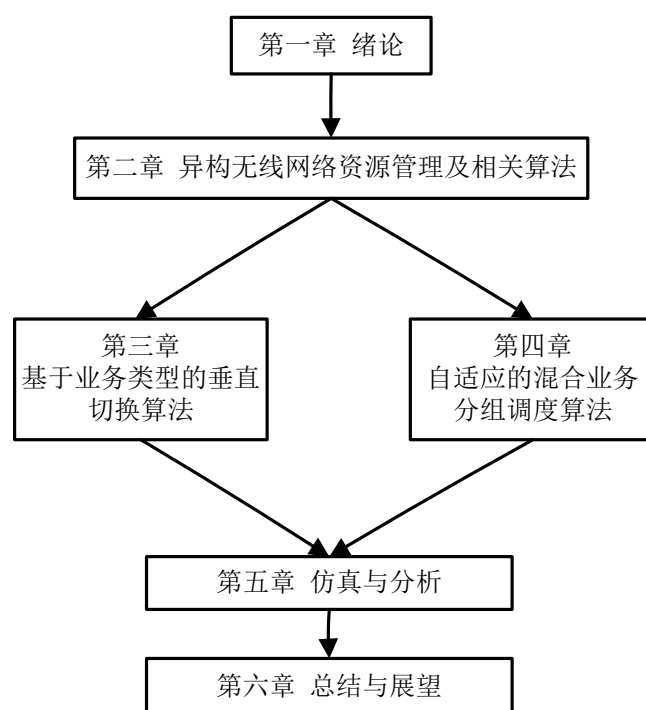


图 1.2 论文结构图

第 2 章 异构无线网络资源管理及相关算法

2.1 引言

智能手机、笔记本和其他各类无线电子产品逐渐成为人们生活工作中不可或缺的重要组成部分。该类无线电子产品的功能日趋丰富复杂，出现了各种集成不同制式、不同技术的无线多模终端产品。但终端用户不可能了解各网络运行的实际情况，结果导致接入困难、业务服务质量不高和网络拥塞频繁的现象。HWN 作为未来无线通信的基础，多网络协作通信、协同工作成为必然，同时良好的无线资源管理策略是保证通信质量的重要途径。因此，对 HWN 的研究具有极其重要的意义，受到很多通信界以及学术研究机构的广泛重视。

本章首先介绍 HWN 的基本概念，指出网络的异构性是 HWN 最为显著的特点之一，接着从用户终端、业务等方面介绍了 HWN 的一些特点。然后阐述异构无线资源管理技术，介绍了垂直切换概念与业务分组调度概念，并总结现有相关算法的局限性。

2.2 异构无线网络及其资源管理

2.2.1 异构无线网络概述及特点

未来的无线网络将是 3G 网络、4G 网络、WLAN 及其他无线网络组成的 HWN，通过 IP 骨干网进行互联互通，对用户提供服务。未来的用户终端是一种多模接入的设备，这些多模终端将通过切换技术在不同网络中获得服务。异构无线网络如图 2.1 所示。

现有的异构网络融合按照系统间结合的紧密程度可分为紧耦合和松耦合两种^[42]。紧耦合和松耦合最大的区别在于是否存在主从关系。所谓紧耦合，是指两种不同的无线接入技术（Radio Access Technology, RAT）共用一个核心网，但是 RAT 系统之间存在主从关系。比如 WLAN 网络中的接入点通过专用接入网关连接到蜂窝网的核心网，而它在异构网络融合中所需要用到的功能模块都由蜂窝网系统提供。所谓松耦合，是指两种不同的 RAT 系统之间通过共用一个核心网结合在一起，但是 RAT 系统之间以相互独立的、平行的方式结合在一起，不存在任何从属关系。HWN 通过在核心网以及多模终端中设置若干个功能模块来实现终端的认证授权、无线资源管理以及终端移动性管理。

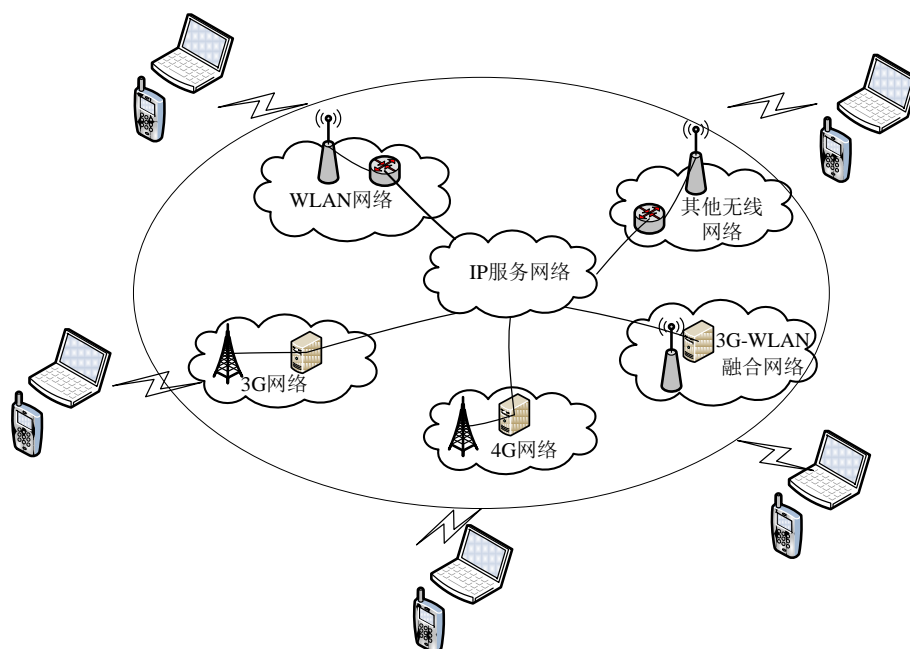


图 2.1 异构无线网络示意图

HWN 的协议栈与同构网络 OSI(Open System Interconnection) 模型架构及 WLAN 的 MIP 模型架构相比有区别，包括应用层、传输层、网络层和承载层^[43]。这是因为 HWN 是一个由多种网络组成的混合网络，各网络之间的协议都不尽相同，但又需要互联互通。HWN 协议栈模型如图 2.2 所示。

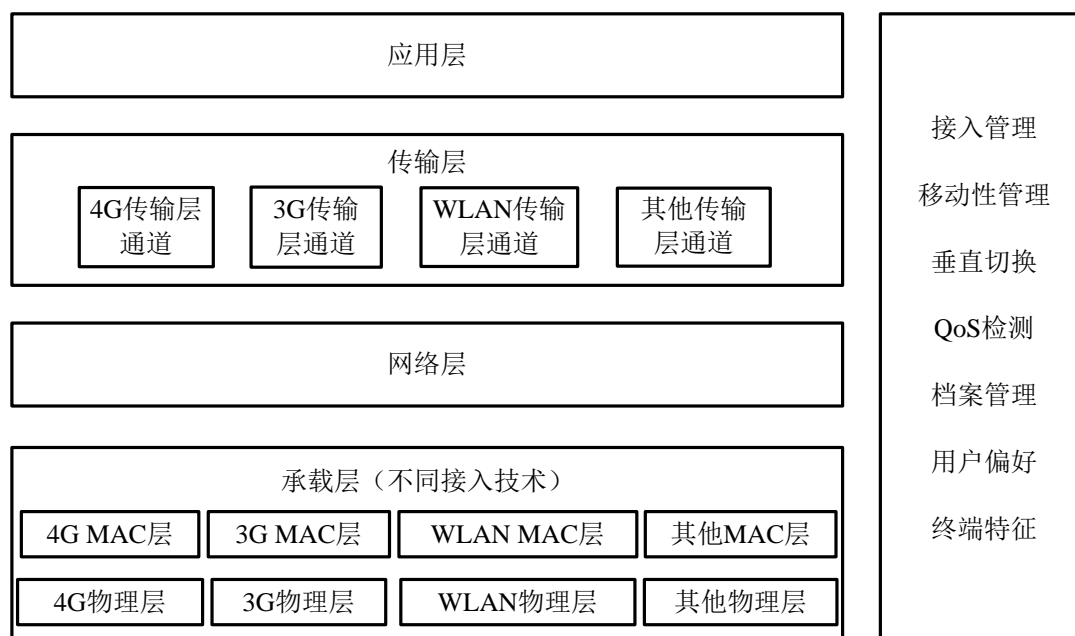


图 2.2 异构网络协议栈模型

应用层主要为终端用户提供网络服务与应用。对于不同业务类型的需求，终端用户可以通过选择合适的网络处理不同的业务，也可以利用网络切换实现多网络来处理同一业务。

传输层主要传输各种业务数据，并对其流量进行控制，保证上层业务数据流的有序可靠传输。HWN 中各种网络接入技术链路物理特性不同，保证端到端的数据传输比控制链路级的报文更重要。

网络层主要根据不同的路由协议实现不同报文的端到端传输。路由协议主要根据网络特性进行定义。HWN 中的路由协议需要考虑网络的异构性和互操作性等。HWN 基于 IP 网络更好地实现网络的扩展性和兼容性。

承载层是 HWN 区别于传统网络最大的特点。HWN 是由层次划分不同的无线接入网络构成的混合网络，为了屏蔽不同网络间的差异，将不同接入网络的物理层和数据链路层统一划分为承载层，使不同网络互联互通，实现融合。

HWN 的异构性主要表现在接入技术、用户终端、业务类型、网络运营商和网络协议等众多方面。

(1) 接入技术的异构性

终端在 HWN 系统中将面对具有不同技术的无线接入网络，这些接入网拥有的技术参数，包括带宽、时延等不同，支撑业务能力不同，执行的协议不同，网络覆盖的范围不同，甚至具有不同的网络结构，比如蜂窝和自组织网等。不同的网络技术对应不同的空中接口，包括频段、双工模式及编码方式等也有所不同。

(2) 终端的异构性

在 HWN 中，智能多模终端具有网络接入、人机交互、计算分析、甚至供电等多种业务能力；终端处于各种运动状态导致接收环境也有所不同，比如终端在郊区、市区、室内和室外等不同的环境所表现的性能也是不同的；同时通信设备的通信接口的定义得到扩展，具有不同无线网络的接入能力，包括消费电子设备等在内的各类设备。

(3) 业务的异构性

由于终端具有多种业务能力，会有不同的业务类型需求，使得业务的多样化。这些不同的业务对网络和终端提出 QoS 要求也是不同的。多模智能终端可以根据业务需求，随机自由选择不同网络通信。

(4) 网络运营商不同

一些移动通信网络都有各自运营商，不同的运营商将设计出不同的运营管理策略，包括网络计费、认证等。比如 WCDMA、TD-SCDMA 和 CDMA2000 分别由联通、移动和电信三大运营商管控。不同运营商在保证网络互联互通的基础上，在 QoS 的处理上也会有较大差异。

2.2.2 异构无线网络资源管理

HWN 资源管理主要负责各种无线网络资源分配和管理，提供端到端的 QoS 的保证，优化网络性能，防止网络拥塞，降低信令开销，从而提升资源利用率、

系统容量和用户满意度等。

无线资源管理的主要包括 5 大模块，具体如下：

(1) 功率控制模块：主要作用是控制功率消耗，节省功率。在维持通信质量的前提下，将功率资源消耗控制在最低水平，减小网络中的相互干扰，延长终端的电源的使用时间，从而保证长时间的网路服务。

(2) 切换控制模块：主要作用是保证切换的无缝性。当用户终端在两个不同网络或相同网络的边界移动时，通过网络切换从当前网络通信链路转到其他网络链路，从而保证呼叫的连续性，避免通信中断。

(3) 接入控制模块：主要作用是控制用户接入。为了保持网络的稳定性，以及已接纳用户的服务质量，网络端根据当前网络状态来决定是否接纳新的用户或越区切换用户，避免网络拥塞或资源紧缺。

(4) 负载控制模块：主要作用是计算网络信息负载，并将网络负载信息提供给切换控制模块、接入控制模块。当网络出现过载情况时，通过联合切换控制模块、接入控制模块分别对用户终端进行切换和接入控制，进而控制网络负载，将网络恢复到正常的状态。

(5) 分组调度模块：主要作用是服务分组数据业务，分组调度分为慢速和快速调度。调度速率由网络负荷情况决定，网络负荷越大，需要的调度速率就越大，避免网络拥塞。

在 HWN 中，用户终端在多模接口的支持下，可以在不同网络系统中进行切换，要求网络提供语音、数据业务等传统的一些业务需求，同时还要求网络提供移动视频、移动电子商务、移动远程教育等具有很大大商业价值和潜力的应用。在满足基本业务需求的同时，要求享有网络提供的高速率低时延等服务。为了保障 QoS 和提高资源利用率，HWN 系统需要无线资源管理机制来进行控制。HWN 资源管理不仅需要包含所有的传统网络中无线资源管理的内容，也应包括综合无线接入网络融合技术，如垂直切换、接入选择等功能。

下一代无线通信系统中的无线资源管理问题将会面临着极大的挑战。其中，垂直切换技术及切换前后的业务分组调度及资源调整分配尤其重要。因此，本课题针对 HWN 资源管理技术中的垂直切换及分组调度进行研究具有较大的意义和价值。

2.3 垂直切换算法

2.3.1 垂直切换与水平切换

切换技术指的是移动节点 MN (Mobile Node) 处于当前服务小区的边缘，并

准备进入另一小区，MN 断开与原基站之间的链路，与新服务小区的基站建立链接以保证不中断通信会话的技术。HWN 因其典型的异构特征，要求切换技术能够实时地保证移动终端实现无缝切换。在各种切换类型中，垂直切换和水平切换的主要区别在于无线接入技术是否相同。水平切换是指同类技术网络间的切换，比如 WCDMA 网络中的不同交换系统之间以及 WLAN 技术中不同 AP 之间的切换。垂直切换是指不同类别的接入技术之间的相互切换，比如，UMTS 网络和 WLAN 网络之间的切换。垂直切换与水平切换示意图如图 2.3 所示，两者比较见表 2.1。

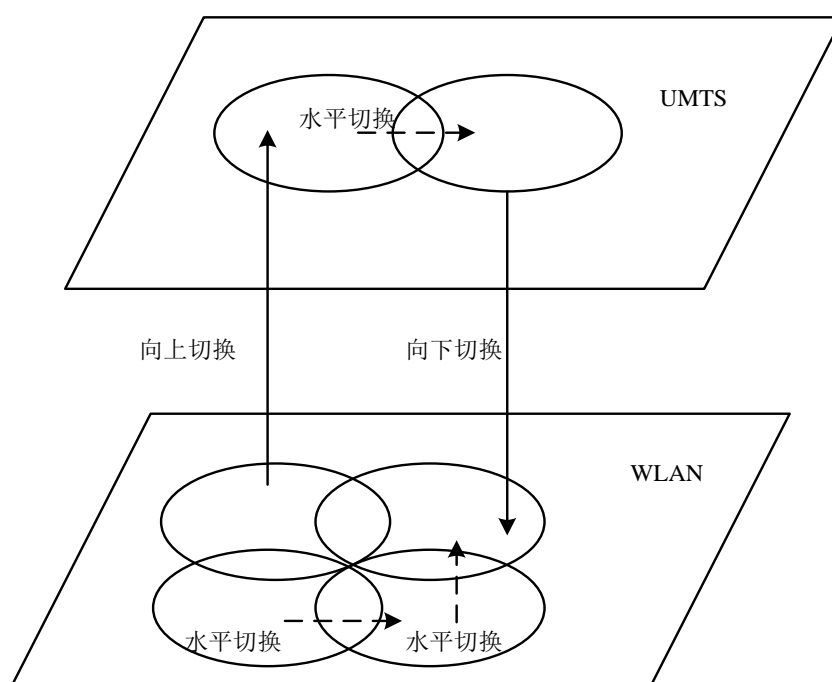


图 2.3 垂直切换与水平切换示意图

表 2.1 垂直切换与水平切换比较

切换类型 比较选项	水平切换	垂直切换
对称性	无对称性	向上切换和向下切换
接入技术	接入技术相同	接入技术不同
触发原因	位置变化	位置变化、接入技术变化
决策因素	信号强度 RSS	整体考虑与应用、用户、终端、网络等有关的因素
控制方式	网络控制、终端辅助	终端控制
链路转换	在链路层实现	在链路层、网络层、传输层或应用层实现

2.3.2 切换原因及控制方式

（一）切换原因：

传统意义上的切换仅仅是在蜂窝移动通信网络中保护通话的移动终端从一个小区漫游到另一个小区，防止通信中断。随着各项接入技术的飞速发展，终端用户对多样化应用及其服务质量的需求也随之日益增长。但是传统的切换技术对于复杂的 HWN 环境不具有很强的实用性。HWN 环境下的垂直切换技术需要根据终端用户的移动、网络服务质量、网络负载等多方面原因进行深入研究。切换的原因概括如下^[44]：

（1）网络服务质量不满足终端用户需求

终端用户因不满足当前网络的服务质量而主动发起切换。如果有 3G 网络和 WLAN 覆盖，而 3G 网络不能保证用户视频业务的服务质量，WLAN 网络能够提供宽带高速上网，此时终端用户会主动由 3G 网络切换为 WLAN 网络，保证视频业务的正常传输及服务质量。

（2）终端用户移动

如果终端用户正在 WCDMA 网络中使用语音业务，当它移出当前服务小区时，同时检测到新的信号，为保证用户会话的连续性，该终端用户需要连接到其他的网络基站。

（3）网络负载不均衡

在机场、地铁站、酒店等热点地区，用户密集，网络负载过重时导致网络拥塞。为了提高无线网络资源的利用率，保证终端应用的 QoS，终端用户切换周围负载数量少的网络，从而减轻当前网络负载。

（4）设备故障

网络服务器、路由器、交换机等核心网设备或者其他设备出现故障，终端用户为享受服务而切换到满足其业务 QoS 需求的网络。

综上所述，切换原因虽不相同，但其实质可以简单的总结为终端的服务质量不能达标。引起切换的常见原因是网络服务质量不满足终端用户需求，终端用户移动，网络负载不均衡。

（二）控制方式：

根据执行和发起切换的实体不同，可以将切换的控制方式分为终端控制切换、网络控制切换、终端和网络端共同控制切换、终端辅助切换^[45]。

（1）终端控制切换

终端控制方式的切换主要针对垂直切换，终端用户在整个过程中是主动的。HWN 间的性能差异比较大，终端用户一直监测网络信号的质量和强度，直到目标网络的信号比当前网络信号强并达到切换指标时，请求移动交换中心进行切

换。终端用户根据应用的实际需求切换至合适的网络。

(2) 网络控制切换

网络控制方式的切换主要针对水平切换，终端用户在整个过程中是被动的。网络端利用通信端口监视终端用户发来的信号强度和质量优劣报告给网络，并根据终端用户接收到的信号强度与某个预设阈值比较。如果信号强度低于某个预设阈值时，网络端将触发终端切换到新的网络通信端口。

(3) 终端和网络端共同控制切换

终端和网络端共同控制方式结合了终端控制和网络控制的两种方式。该种切换控制方式既考虑了终端用户偏好和终端的实际应用情况，又综合考虑了网络负载以及网络信号变化等。当终端用户有新的业务需求或用户偏好，而当前网络不能满足终端用户的实际需求时，终端用户切换至符合要求的网络。当某个网络负载过大或者网络信号较差时，网络端通过转移一部分负载至邻近的网络，以减轻当前网络负担尽量使网络负载均衡。该种共同切换的方式必然是适合未来异构无线融合网络的主流切换控制方式。

(4) 终端辅助切换

终端辅助切换主要针对水平切换。该种切换是建立在网络控制切换的基础上，同时需要终端参与切换信息的收集，包括监测附近端口的信号强度，并将收集的切换信息上报给网络端口，然后网络端通过分析决定是否进行切换以及切换到哪种网络端口。

2.3.3 垂直切换过程

垂直切换过程包括网络发现、切换决策和切换执行三个阶段^[46]，具体如下：

(1) 网络发现阶段

网络发现阶段用于发现当前可接入的网络，即生成候选目标网络。在异构网络中，具有多种无线网络接入能力的多模终端在检测可接入的网络时，其网络接口一直处于监测状态，导致终端极大地消耗能量。异构网络中，多模终端拥有接入多种无线网络的能力。多模终端为了使用户能够及时接入网络性能更好的网络，其通信接口一直处于发现状态。因此，一个有效可靠的网络发现方法需要考虑能量消耗和网络发现时间。

(2) 切换判决决策阶段

切换决策阶段用来判断选择最佳的目标切换网络。一个好的切换决策方案可以在较合适的时间点促使 MN 切换到性能最佳的网络中。切换决策阶段是垂直切换过程中核心部分。这一阶段的切换决策算法直接决定了垂直切换的无缝性和其他方面性能的表现，也就包括能否保证移动用户的通信服务质量。切换决策因素主要和三方面有关，分别为网络相关、应用相关、用户相关。这三方面的切换决

策因素可以分为静态因素和动态因素。由于终端用户移动变化频率较高，常常在不同网络间变化位置，更容易获得不同网络的信息，所以终端控制切换方式更适用于当今多样化、复杂化 HWN 环境。

(3) 切换执行阶段

切换执行阶段执行网络切换。该阶段是将正在进行的通信会话从当前网络中的接入点转移至目标网络中的新接入点的过程。该过程必须将切换时延严格限制在终端用户可接受的范围内，否则会导致 QoS 严重下降，甚至导致会话中断。

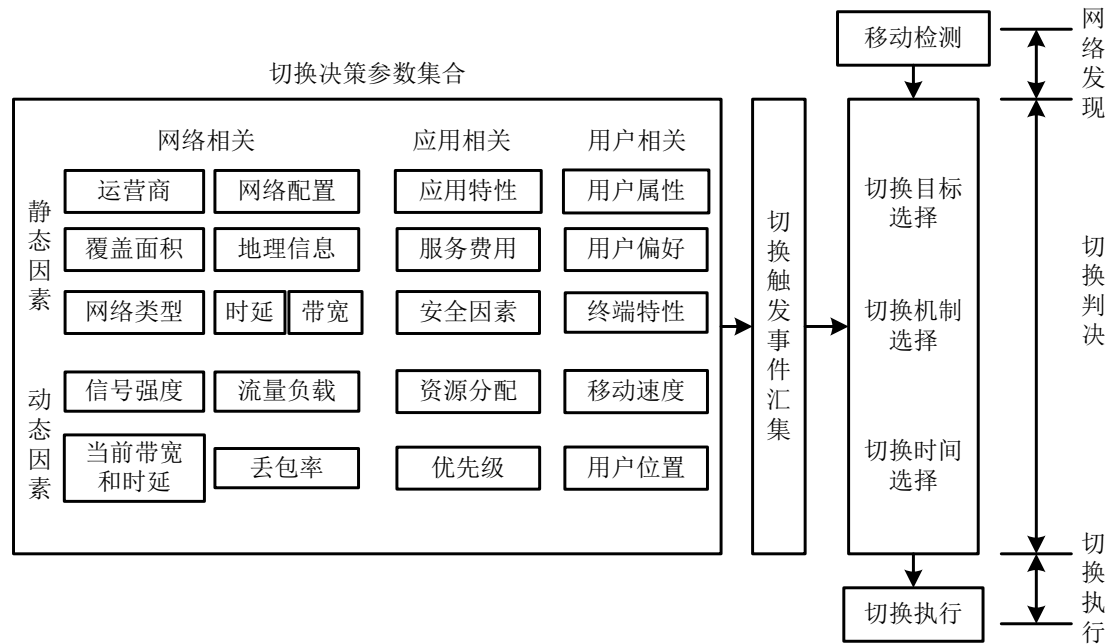


图 2.4 垂直切换过程

2.3.4 现有算法总结

在 HWN 中，垂直切换决策因素较多，需要网络运营商和用户等实体共同参与。不同的终端用户都需要根据自身的需求来进行垂直切换。为了保证自己的 QoS，这些终端用户之间因竞争而产生矛盾的一面。统一合理的评价标准可以保证的垂直切换算法的有效性和可靠性。因此，本节仅从切换判决算法层面，对各个算法在判决因素、用户偏好、有效性等方面进行分析和比较，来考察不同的垂直切换算法的性能。垂直切换算法比较如表 2.2 所示。

基于单一因素垂直切换算法，复杂度较低，但是单一因素已经不适合 HWN。基于代价函数的垂直切换算法虽然考虑了多个因素、复杂度较低，但是该算法应用的灵活性一般。基于多属性决策垂直切换算法，虽然考虑了多个因素，有效性和灵活性非常好，但是算法复杂度太高，很难在实际中得到应用。基于模糊逻辑和神经网络的算法，有效性非常高，但实现复杂，需要进一步的改进和优化。

表 2.2 垂直切换算法比较

算法性能 切换算法	多因素	用户偏好	有效性	灵活性	算法复杂度
RSS	否	否	低	低	低
代价函数	是	中	中	中	低
多属性	是	中	中	中	中
模糊逻辑	是	中	高	高	高
神经网络	是	中	高	高	高
上下文感知	是	强	高	高	中

以上各种垂直切换算法各有优势和不足，在 HWN 的垂直切换算法中还要从业务类型上考虑。异构网络支持的是多业务，我们需要考虑不同业务在切换中的 QoS 指标问题。针对目前的垂直切换算法不适合不同业务 QoS 指标的用户，导致掉话率高，切换次数较多，非实时业务占用实时业务带宽资源，降低了用户的 QoS 等问题，第 3 章考虑到异构网络的异构性及用户业务的多样性和 QoS 指标不同，在垂直切换判决中根据不同业务 QoS 指标赋予权重因子，同时引入垂直切换判决值，并针对实时业务和非实时业务分别设置判决时延门限值，适合不同业务的切换。

2.4 业务分组调度算法

2.4.1 分组调度原因

随着 HWN 逐步发展，新的网络技术也在不断发展，用户终端通过接入、切换技术，始终处在最优网络中，网络中传输的信息数量在急剧增加，整个异构网络面临最大的考验就是网络拥塞，严重影响了网络的服务质量。一个合理的调度算法是解决网络拥塞的重要方法。分组调度原因主要归结于以下两点：

(1) 链路信道容量不足

根据香农信息理论，信息在信道传输的可靠性取决于信息传输速率和信道容量。当信息传输速率超过信道容量时，就不能保障传输的可靠性；反之，根据不同网络特征，采用相应的信道编码和调制方式可以实现信息传输的可靠性。当接收的数据流速率大于信道容量时，节点缓存区内的数据分组队列长度加长。当缓存区的分组队列达到最大长度上限值，容易导致网络拥塞，从而发生丢包现象。如果传输链路带宽较小，高速的数据流在该链路传输时，容易产生拥塞现象，网络性能将会受到影响。

(2) 缓存区存储空间不足

当网络中节点接收到不同链路传输的数据时，接收的数据分组会在节点的缓存区内排队。如果缓冲区存储空间容量较小，缓冲区排队的数据分组很容易超过它的容量上限值，那么丢包现象就会时常发生。如果网络中有突发数据流，这将导致节点在很短的时间内出现负载过高现象，如果没有足够的缓冲存储空间，就会导致网络拥塞。

由于网络间的异构性，网络资源及其需求分布存在不均衡的现象。网络拥塞现象是一个动态问题，随着用户传输的信息数量而变化，如果只考虑增加网络资源，并不能有效避免网络拥塞。传统有线网络的拥塞控制机制不适用于复杂的HWN环境。针对HWN特点，设计分组调度机制来避免拥塞是近年研究热点^[47]。

2.4.2 分组调度算法分类

目前的分组调度算法主要分为基于实时业务的分组调度算法和基于非实时业务的分组调度算法。实时与非实时用户对其QoS水平要求各不相同。对于非实时业务，比如网页浏览，网络游戏，移动定位，下载等，其QoS主要指标是丢包率，对传输时延要求较低。用户得到的丢包率越小，数据传输得就越好，那么用户的QoS总体性能也就越高。一些非实时用户，它们对服务的响应时间也提出了一定要求。对于非实时业务，比如语音业务、可视电话等，对传输带宽具有一定要求以外，更重要的是具有非常严格的传输时延要求，

下面主要介绍经典的实时业务分组调度算法及实时业务分组调度算法。

(1) 经典的实时业务分组调度算法

经典的实时业务分组调度算法有M-LWDF(Modified Largest Weighted Delay First)算法^[48]，该算法通过加入一个时延因子改进PF算法。用户调度优先级可以用(2-1)式表示：

$$Q_{k,m}(m) = a_k W_k(n) \frac{r_{k,m}(m)}{R_k(n)} \quad (2-1)$$

其中， $Q_{k,m}(m)$ 表示用户 k 在子载波 m 上的调度优先级， $a_k = \log(\delta_k)/\tau_k$ 表示对时延敏感类业务的优先级因子， τ_k 为用户 k 能忍受的最大分组时延， δ_k 是超出的最大时延的分组比例上限， W_k 是缓存区队首时延， $r_{k,m}(m)$ 表示用户 k 在子载波 m 上的吞吐量， $R_k(n)$ 是用户 k 到第 n 个时刻位置之前获得的平均吞吐量。上式仅仅适用于时延敏感的业务，当业务中时延敏感业务与数据率敏感的业务并存时，就要用到如下的调度方式：

当 i 为时延敏感业务时

$$Q_{i,k}(n) = \alpha_i w_i(n) \frac{r_{i,k}(n)}{R_i(n)} \quad (2-2)$$

当 i 为数据率敏感业务时,

$$Q_{i,k}(n) = \alpha_i \frac{r_{i,k}(n)}{R_i(n)} \quad (2-3)$$

其中, α_i 是优先级因子。随着 α_i 增大, 数据率敏感业务的优先级会变大, 导致时延敏感业务的平均分组时延变大, 从而丢包率变大。

(2) 经典的非实时业务分组调度算法

经典的非实时业务分组调度算法主要有最大载干比 MAX-C/I (Maximum Carrier to Interference, Max C/I) 算法和比例公平 PF (Proportional Fair) 算法。MAX C/I 算法^[49]是一种典型的最大化系统容量的调度算法。该算法根据接收信号的 C/I 预测值进行由大到小排序, 预测值最大的优先级最高, 优先传送数据。预测值表达式如 (2-4) 式所示。

$$K = \arg \max(C/I) \quad (2-4)$$

比例公平 PF 算法^[50]的调度策略是传输当前最逼近信道峰值的用户数据, 即每次调度时选择信道质量相对最好。该算法的调度判决表达式如 (2-5) 所示。

$$k = \arg \max \frac{[R_k(t)]^\alpha}{[T_k(t)]^\beta} \quad (2-5)$$

其中, $R_k(t)$ 表示在 t 时刻, 用户 k 的数据传输速率, $T_k(t)$ 表示同一时刻在用户 k 的平均传输比特速率, α 和 β 是系统调度需要的公平性修正因子, 一般设定 $\alpha = \beta = 1$

$$T_i(t) = \begin{cases} (1 - \frac{1}{T_c})T_i(t-1) + \frac{1}{T_c}R_i(t), & i = k \\ (1 - \frac{1}{T_c})T_i(t-1), & i \neq k \end{cases} \quad (2-6)$$

其中, $T_k(t)$ 一般由上式所示进行更新, 其中 T_c 是一个时间的窗口参数。 T_c 越大, 则系统吞吐量越大, 但是用户的队列长度变大导致用户等待服务的时间变长; T_c 越小, 调度的公平性就越好。

2.4.3 混合业务调度算法

文献^[51]提出 TF-RNS(Temporal Fairness based Real/Non-real time Scheduling) 算法, 该算法基于服务时间公平的分配资源, 利用如图 2.5 所示的独立分级结

构实现混合调度机制。

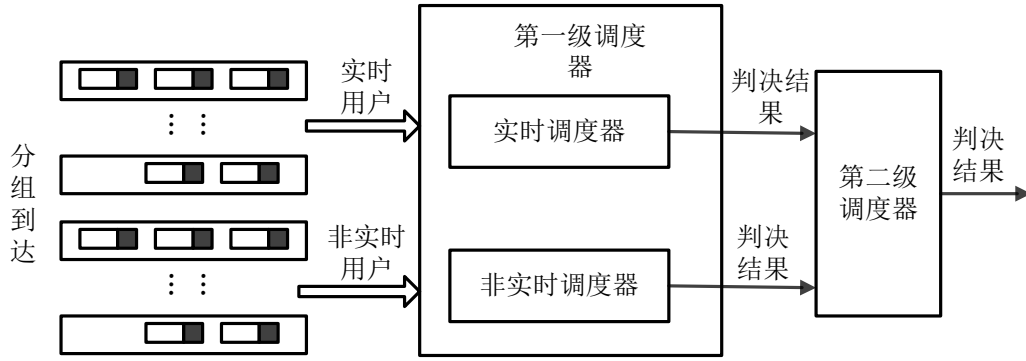


图 2.5 TF-RNS 的调度框架

第一级调度过程中，对于实时业务使用 M-LWDF 算法，而对于非实时业务，使用 PF 算法，针对不同业务类型采用不同算法进行独立判决。实时调度器采用修改的 M-LWDF 调度策略，实时业务优先级 P_R 判决过程如公式 (2.7) 所示。

$$P_R = \max_k \left\{ -\frac{\log(d_k)}{T_k} * \frac{SNR_k(t)}{SNR_k} * W_k(t) \right\}; k \in B_R(t) \quad (2-7)$$

非实时调度器采用修改的 PF 调度策略，非实时业务优先级 P_N 判决过程如公式 (2-8) 所示。

$$P_N = \max_k \left\{ \frac{SNR_k(t)}{SNR_k} \right\}; k \in B_N(t) \quad (2-8)$$

其中， $SNR_k(t)$ 表示用户 k 在时隙 t 的接收信噪比， $\overline{SNR_k}$ 表示用户 k 的平均信噪比， d_k 表示分组丢包率， T_k 表示分组传输时延， $W_k(t)$ 表示分组等待时间， $B_R(t)$ 和 $B_N(t)$ 分别表示系统在时隙 t 所有待发送的实时和非实时分组用户的集合。

第二级调度根据 (2.9) 式要求，保证实时和非实时用户在服务时间上的公平性。

$$\left| \frac{S_R(t_1, t_2)}{M} - \frac{S_N(t_1, t_2)}{N} \right| \leq \delta \quad (2-9)$$

其中 $S_R(t_1, t_2)$ 表示所有 M 个实时用户在 (t_1, t_2) 内获得的服务时间， $S_N(t_1, t_2)$ 表示所有 N 个非实时用户在 (t_1, t_2) 内获得的服务时间， δ 是一个大于 0 的常数。

2.4.4 现有算法总结

目前使用较多的非实时调度算法主要有 RR、Max C/I、PF 算法等几种。这些算法在调度非实时业务时具有简单、易于实现等诸多优点，但是没有时延约

束限制，无法保证业务在传输时的时延要求，所以无法满足对实时业务的调度要求。另外，使用较多的实时调度算法主要有 M-LWDF、EXP 等算法，这些算法有很好的时延特性，主要是为了支持实时业务的调度，这两种算法是实时业务吞吐量最优的算法。对于混合业务的调度来说，M-LWDF 和 EXP 算法并不能分出数据率敏感业务的 QoS 级别，而 RR、Max C/I 和 PF 算法也不能分出时延敏感业务的 QoS 级别，所以都不适合混合业务调度。TF-RNS 算法提出了一个具有独立分级结构的混合调度机制，在第一级调度过程中使用 M-LWDF、PF 两种算法，判决实时和非实时用户业务并进行联合调度。但是调度分级结构过于复杂，会影响业务分组的 QoS。目前研究的业务分组调度算法基本上只适合同构无线网络环境下实时或非实时业务，不适合 HWN 环境下的混合业务调度。

针对目前的分组调度算法不适合 HWN，第 4 章考虑到异构网络的异构性及用户的移动性，为每个不同制式网络配置 QoS 策略代理，设计随网络资源变化动态调整调度策略的机制。TF-RNS 算法虽然适合混合的实时、非实时业务，但是调度分级结构复杂，效率较低。本文提出了一种自适应的混合业务 (A New Adaptive Hybrid-traffic, NAH) 分组调度算法。该算法取代 TF-RNS 算法中的二级调度的复杂过程，为不同业务提供优先级权重因子，使得不同业务实际 QoS 水平与对应 QoS 需求成比例，适合混合的实时与非实时业务。

2.5 本章小结

本章从介绍 HWN 网络的基本概念出发，根据 HWN 网络的特点介绍了一些无线资源管理技术，提出垂直切换和资源调度是关键。本章主要介绍了垂直切换技术的相关概念，包括切换原因及控制方式，还有垂直切换过程，总结了现有算法，对需要改进的地方提出相关解决方法。接着，本章也介绍了分组调度技术的相关概念，包括基于实时业务、非实时业务、混合业务几种分组调度算法，分析了现有分组调度算法在 HWN 网络中存在的局限性，接着对需要改进的地方提出相关的解决方法。

第3章 基于业务类型的垂直切换算法

3.1 引言

随着网络用户及其需求业务类型的日益增多,在诸如商场、车站、机场等城市的热点地区,移动用户数量较多,通常情况下这些区域的无线资源会更加紧缺,用户对资源的竞争也变得激烈。在满足用户对非实时业务的需求下,人们对实时业务的服务质量提出了更高要求。如何根据实时、非实时业务的 QoS 性能指标来进行切换判决,降低掉话率,减少切换次数,避免非实时业务占用实时业务带宽资源,提升 HWN 资源利用率成为无线资源管理的难点。针对目前异构无线融合网络的垂直切换算法在切换判决阶段的判决策略及切换执行阶段的切换时延问题上没有区分业务类型,导致不必要切换,掉话率高,传输质量差等问题,本章提出一种基于业务类型的垂直切换算法(Vertical Handoff Algorithm Based On the Type of Business, VHA-TB)。在保证终端 QoS 的前提下,根据用户类型以及用户的需求选择相应的切换策略,能有效地提高垂直切换性能,最大化资源利用率。

3.2 业务类型

在 HWN 中,不同业务具有不同的特性,为了保障不同业务在垂直切换过程中的 QoS,需要针对不同类型的业务采取不同的切换策略。为了突显不同业务对资源需求的差异性,更合理为其分配资源,首先对业务进行分类,然后区分业务执行不同的分配策略。根据业务特性,我们定义四种业务类型,分别为会话类、交互类、后台类和流类。

会话类包括语音、可视电话等,属于实时业务,对抖动、时延的要求很高,对误码率要求不高。多媒体 VoIP 的应用属于实时会话类,要求较低的端到端的时延。在视频音频会话中,用户主观体验决定了端到端的最大时延不能超过 400ms。如果不能保证较低的时延,服务质量将会严重下降。

交互类和后台类主要用于数据服务,如网页、电子邮件、FTP、Telnet 等。交互类业务要求较低的误码率,对抖动、时延没有严格的限制。后台类对误码率、时延和抖动的限制性要求最低。交互类和后台类业务的主要区别在于:交互类主要用于交互型应用,如 Web 浏览等应用;而背景类主要用于后台下载等应用,如 E-mail 发送、FTP 等。

流类指流媒体等业务,流类业务单向传输,不需要进行交互。和会话类业务相比,流类业务对实时性要求较低,归属为非实时业务。流类业务对抖动、误码

率要求不高。

业务类型对应关系见表 3.1。

表 3.1 业务类型对应关系表

业务类型 应用与特征	实时业务	非实时业务		
分类	会话类	交互类	后台类	流类
应用举例	语音、可视电话	网页浏览	Email、FTP 文件下载	流媒体
主要特征	保证数据的顺序；要求低时延	请求-响应模式；保证数据的完整性	数据没有时延要求；保证数据的完整性	保证数据顺序关系

3.3 系统模型

2G 网络，3G 网络和 4G 网络的信号是连续覆盖的，WLAN 是作为热点部署的，信号覆盖是不连续的。通常情况下，WLAN 是设置在市区、车站、商务楼、酒店等人流密集的地方，垂直切换系统模型如图 3.1 所示。

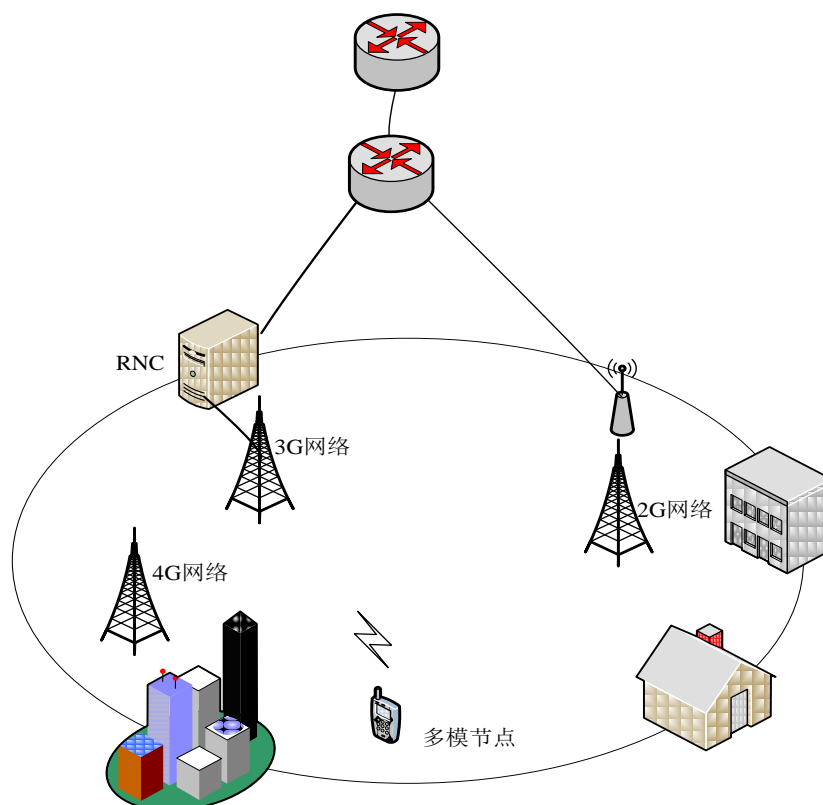


图 3.1 垂直切换系统模型

在 HWN 中，为了保证用户使用的服务在切换时不中断，且保证 QoS，MN

要在恰当的时候切换至合适的网络，即做出正确及时的垂直切换判决。

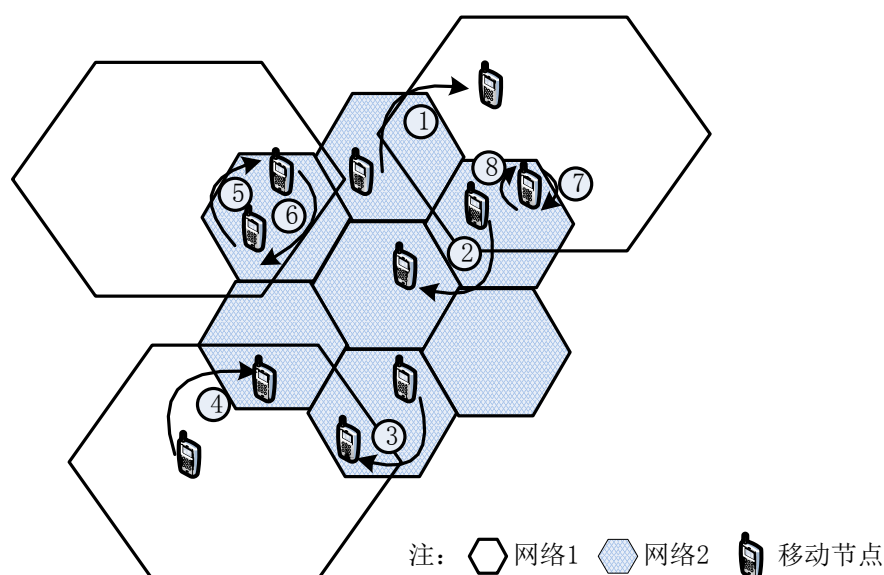


图 3.2 切换场景模型

切换场景如图 3.2 所示：

- （1）当前网络信号减弱时，切换过程如图中的①由网络 2 切换到网络 1，②由网络 1 切换到网络 2；
- （2）当检测到新信号时，切换过程如图中的③由网络 2 切换到网络 1，④由网络 1 切换到网络 2；
- （3）当服务类型改变时，切换过程如图中⑤由网络 2 切换到网络 1，⑥由网络 1 切换到网络 2；
- （4）当网络出现拥塞时，切换过程如图中⑦由网络 2 切换到网络 1，⑧由网络 1 切换到网络 2。

3.4 切换判决因素

切换判决需要考虑影响切换决策的决策标准。本文中提出的算法的切换判决指标是：接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)、网络带宽(Bandwidth)、网络时延(Network Delay)、丢包率(Packet Loss)、服务费用(Service Cost)和用户偏好度(User Preference)。切换判决指标作为计算垂直切换判决值的输入参数。

接收信号强度是垂直切换要考虑的重要指标之一。信号在传输的过程中，由于快衰落、慢衰落等原因，导致正在通信的网络信号强度随机变化，其中常见的问题就是信号强度变弱、不稳定，信号受到干扰等。

网络带宽表示每个网络的传输能力，网络所能提供的带宽也是一个需要考虑的因素。由于每个网络覆盖区域内用户数不止一个，所以每个用户只能共享有限

的带宽。当一个网络的用户数过多，带宽过低时，就会影响用户对该网络的选择。

网络时延关系到终端用户的服务质量，也是在切换判决时所需要考虑的因素。网络时延的长短是由网络的拥塞程度、MN 本身、网络性能等多方面决定的。网络时延越小，用户体验就会越好。

丢包率是切换判决时所需要考虑的因素。每个网络适合传输哪种业务决定了丢包率的大小，用户总是希望丢包率尽量地小。因此网络丢包率也关系到网络切换问题。

服务费用是关系到终端用户的切身利益问题，用户对不同网络服务费用的可接受程度不一样，因此也会对网络切换造成影响。LTE 网络能够提供无缝的接入，服务质量有保证，运动中的节点需要及时通信，因此可以接受 LTE 网络资费。如果两种不同网络在满足用户的服务质量上没有差别，服务费用越低的网络当然越易被用户接受。

用户偏好度表示用户对某一网络的偏好程度。终端用户对不同网络都有不同的偏好程度。有些用户终端认为 LTE 网络连续覆盖稳定性高、实时性好。尽管其资费较高，只要它能够满足需求，就愿意偏好 LTE 网络。同时也有终端用户偏好 WCDMA 网络，认为它的数据传输速率高，使用视频业务更流畅，且资费便宜。

3.5 切换判决策略

实时业务和非实时业务需要区别对待切换指标，突出强调某一个或几个切换指标的重要性。对于实时业务，比如语音业务、可视电话等，由于实时业务本身特性，对实时性有很高的要求，其切换指标侧重于接收信号强、网络带宽大和网络时延短。对于非实时的服务，如网页浏览，网络游戏，移动定位，下载等，需要较低的丢包率。

文献^[52]提出了基于模糊控制的垂直切换算法(Vertical Handoff Algorithm Based on Fuzzy Control, VHA-FC)，该算法中虽然针对实时业务和非实时业务来进行切换判决，但是采取了两种不同的切换策略，对于非实时业务，只考虑了当前网络的综合性能评价值，对于实时业务，才区分切换指标的重要程度，严重影响公平性。另外，该算法没有考虑切换执行阶段的切换判决时延问题，导致较高的掉话率和切换次数等问题。

为了解决公平性问题，本节根据模糊控制的隶属函数理论，推导出统一的垂直切换判决公式。实时业务和非实时业务对各切换指标的要求不同。为了区分不同切换指标对不同业务类型的重要程度，对各切换判决指标赋予权值。并利用对切换指标的满意度(Satisfaction Degree)和当前网络及目标网络的满意度计算出垂

直切换判决值(Vertical Handoff Judgment, VHJ)。

对于一个切换判决指标 x ，用 $\mu_{xL}, \mu_{xM}, \mu_{xH}$ 表示业务对其满意度为低，中，高。对于一个网络 $network$ ，其指标 x 的矩阵如 (3-1) 所示。

$$S_{x,n} = (S_{xL,n}, S_{xM,n}, S_{xH,n})^T \quad (3-1)$$

文中， $x = RSS, Bandwidth, Delay, Loss, Cost, Preference$ ，以下用 R, B, D, L, C, P 代表。对于一个网络，用 $S_{x,n}$ 表示对各切换指标的满意度，表达式如 (3-2) 所示。

$$S_{x,n} = \begin{cases} P.S_{x,n}, & x = R, B, P \\ Q.S_{x,n}, & x = D, L, C \end{cases} \quad (3-2)$$

其中，

$$P = (p_1, p_2, p_3), p_1 < p_2 < p_3 \quad (3-3)$$

$$Q = (q_1, q_2, q_3), q_1 > q_2 > q_3 \quad (3-4)$$

对于文中六个切换判决指标， $S_{x,n}$ 分别为：

$$S_{R,n} = P.S_{R,n} = (p_1, p_2, p_3).(S_{R_L,n}, S_{R_M,n}, S_{R_H,n})^T \quad (3-5)$$

$$S_{B,n} = P.S_{B,n} = (p_1, p_2, p_3).(S_{B_L,n}, S_{B_M,n}, S_{B_H,n})^T \quad (3-6)$$

$$S_{D,n} = P.S_{D,n} = (p_1, p_2, p_3).(S_{D_L,n}, S_{D_M,n}, S_{D_H,n})^T \quad (3-7)$$

$$S_{L,n} = P.S_{L,n} = (p_1, p_2, p_3).(S_{L_L,n}, S_{L_M,n}, S_{L_H,n})^T \quad (3-8)$$

$$S_{C,n} = P.S_{C,n} = (p_1, p_2, p_3).(S_{C_L,n}, S_{C_M,n}, S_{C_H,n})^T \quad (3-9)$$

$$S_{P,n} = P.S_{P,n} = (p_1, p_2, p_3).(S_{P_L,n}, S_{P_M,n}, S_{P_H,n})^T \quad (3-10)$$

一个网络 $network$ 的满意度为：

$$S_n = (S_{R,n}, S_{B,n}, S_{D,n}, S_{L,n}, S_{C,n}, S_{P,n})^T \quad (3-11)$$

那么，当前网络 (current network) 和目标网络 (target network) 的满意度为：

$$S_{current} = (S_{R,current}, S_{B,current}, S_{D,current}, S_{L,current}, S_{C,current}, S_{P,current})^T \quad (3-12)$$

$$S_{target} = (S_{R,target}, S_{B,target}, S_{D,target}, S_{L,target}, S_{C,target}, S_{P,target})^T \quad (3-13)$$

设各切换判决指标的权值为：

$$W = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6) \quad (3-14)$$

且满足：

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5 + w_6 = 1 \quad (3-15)$$

则一个网络 *network* 的业务垂直切换判决值

$$VHJ_n = W \cdot S_n \quad (3-16)$$

$$VHJ_n = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6)(S_{R,n}^-, S_{B,n}^-, S_{D,n}^-, S_{L,n}^-, S_{C,n}^-, S_{P,n}^-)^T \quad (3-17)$$

这样，当前网络与目标网络的 *VHD* 值就可以得到了。

$$VHJ_{current} = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6)(S_{R,current}^-, S_{B,current}^-, S_{D,current}^-, S_{C,current}^-, S_{P,current}^-)^T \quad (3-18)$$

$$VHJ_{target} = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6)(S_{R,target}^-, S_{B,target}^-, S_{D,target}^-, S_{C,target}^-, S_{P,target}^-)^T \quad (3-19)$$

针对实时业务，所以接收信号强度、网络带宽和网络时延的权重较大，丢包率、费用和用户偏好度的权重较小，即

$$w_1, w_2, w_3 > w_4, w_5, w_6 \quad (3-20)$$

针对非实时业务，所以网络带宽、丢包率、用户偏好度的权重较大，接收信号强度、网络时延、费用的权重较小，即

$$w_2, w_4, w_6 > w_1, w_3, w_5 \quad (3-21)$$

选择切换目标与切换机制固然很重要，但是切换执行时间也很重要。为了保证切换时延在不同类型业务的 QoS 指标范围之内，定义垂直切换时延(Vertical Handoff Delay, VHD)，即从当前网络切换到目标网络所花费的时间。对于实时业务，切换时延必须严格限制在规定的范围之内，

$$VHD < D_{r_th} \quad (3-22)$$

对于非实时业务，切换时延可以限制在用户接受的范围，

$$VHD < D_{n_th} \quad (3-23)$$

其中， D_{r_th} ， D_{n_th} 分别表示实时业务和非实时业务的最大切换时延门限阈值。

3.6 垂直切换算法流程

(1) 基于业务类型的垂直切换算法流程图如图 3.3 所示：

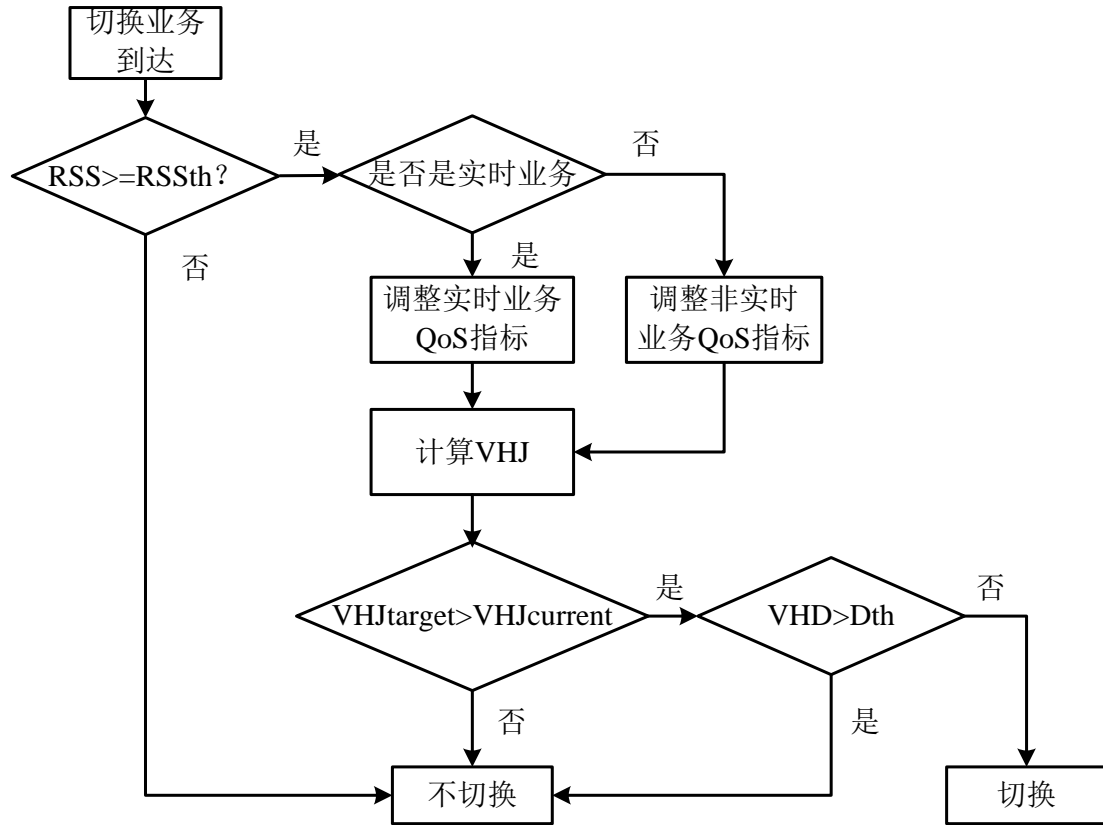


图 3.3 垂直切换算法流程图

(2) 基于业务类型的垂直切换算法步骤:

Step1: 切换业务到达，判断目标网络信号 RSS 是否大于切换门限值 RSS_{th} ，如果是，判断当前业务类型；否则，不切换。

Step2: 当前业务类型，如果是实时业务，调整接收信号强度、网络带宽和网络时延的权重因子，分别对应 w_1, w_2, w_3 ；如果是非实时业务，调整网络带宽、丢包率、用户偏好度的权重因子，分别对应 w_2, w_4, w_6 。

Step3: 计算垂直切换判决值，判断目标网络的垂直切换判决值 VHJ_{target} 是否大于当前网络的垂直切换判决值 $VHJ_{current}$ 。如果是，判断切换时延；否则，不切换。

Step4: 判断切换时延是否大于时延门限值。如果是实时业务，时延门限值必须满足 $VHD < D_{r_th}$ ；如果是非实时业务，时延门限值满足 $VHD < D_{n_th}$ 。满足条件，则切换；否则，不切换。

(3) 基于业务类型的垂直切换算法伪代码:

```

while handoff traffic arrived do
    if  $RSS > RSS_{th}$ 
        if real-time traffic
            change  $w_1, w_2, w_3$ ;
  
```

```

    if  $VHJ_{target} > VHJ_{current} \& VHD < D_{r\_th}$ 
        then handoff;
    else
        stay current network;
else
    change  $w_2, w_4, w_6$ ;
    if  $VHJ_{target} > VHJ_{current} \& VHD < D_{n\_th}$ 
        then handoff;
    else
        stay current network;
else
    stay current network;
end while;

```

3.7 本章小结

针对异构无线融合网络的垂直切换在切换判决阶段的判决策略及切换执行阶段的切换时延问题上没有区分业务类型，导致不必要切换，掉话率高，传输质量差等问题，本章提出一种基于业务类型的垂直切换算法。本算法在切换目标选择时，对切换判决的因素考虑全面，有效地保证了切换时的服务质量，兼顾了用户使用某一业务的成本问题和用户本身对某种网络的偏好程度。该算法首先对信号进行判决，减小切换判决开销；然后利用对切换指标及网络的满意度计算出垂直切换判决值，从而区分不同业务类型对网络的切换选择；最后针对实时业务和非实时业务，引入不同的切换时延门限阈值，保证无缝切换。该算法不仅支持多业务，而且可以保证不同业务的公平性。

第4章 自适应的混合业务分组调度算法

4.1 引言

在 HWN 中,多模用户终端在移动过程中由于远近效应、阴影效应和多普勒效应等原因,导致正在通信的网络信号强度和通信信道随机变化,语音、视频及数据等用户业务出现呼叫阻塞、服务中断等 QoS 问题。为了避免这些问题,多模终端可通过网络选择切换到较优网络。但是,如果在用户集中的情况下,大量的多模终端切换到同种较优网络,将导致最优网络拥塞;同时也会因为该网络拥塞而导致多模终端弃优择次。用户迭代选择网络会使得网络 QoS 严重下降,比如服务延时增加,丢包率增高或吞吐量降低等。此时,一个合理高效的调度及资源分配方法保证其 QoS 最大化,并保证用户的公平性,是影响 HWN 性能的关键因素之一。本章的研究目的是找到一个适合多业务场景的分组调度算法,即对实时业务和非实时业务分组进行同时调度,这个算法必须在公平性、丢包率和时延等方面有较好的性能。但是从研究现状来看,尚不存在一种简单而高效的调度算法实现混合业务调度来满足用户的 QoS 要求。因此,本章提出了一种新型 QoS 保障的自适应的混合业务(A New Adaptive Hybrid-traffic, NAH)分组调度算法。

4.2 系统模型

4.2.1 网络系统模型

文献^[53]提出了异构网络 QoS 框架,如图 4.1 所示。主要由接入网的 QoS 管理模块 ANQM (Access Network QoS Manager)和接入网间交互 QoS 管理模块 IANQM (IP core network Access Network QoS Manager)组成。ANQM 是用来在每个接入网之中监控本地服务质量性能的,而 IANQM 是用来控制异构接入网络之中的 QoS,并且在当移动用户需要转换到其它网络的时候,来决定他们应该选择哪个接入网络。如果当前网络的 ANQM 模块监测到网络中的 QoS 性能指标低于指定的最小阈值时,ANQM 模块就会通知 IANQM 选择新的接入网络,并将用户 QoS 参数标准映射到目标接入网络之中,同时将目标接入网络 QoS 参数传送给终端用户。终端用户根据网络 QoS 参数指标决定是否执行切换。

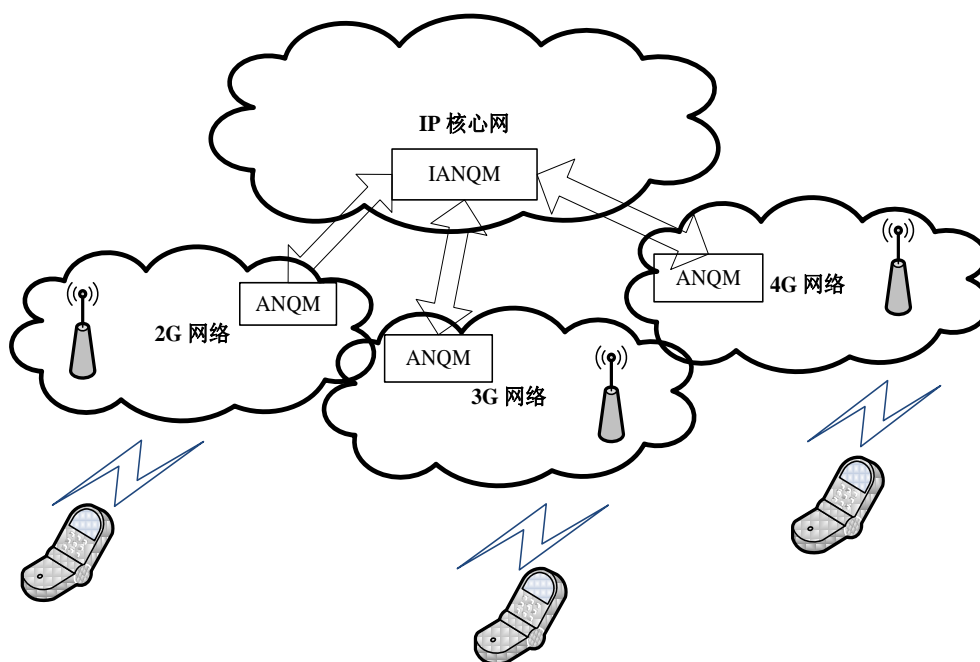


图 4.1 异构网络 QoS 框架

4.2.2 混合业务调度系统模型

混合业务调度就是实时业务和非实时业务共存而形成多业务的分组调度，主要目的就是保证不同用户业务分组的公平性。混合业务分组调度原理框图如图 4.2 所示。

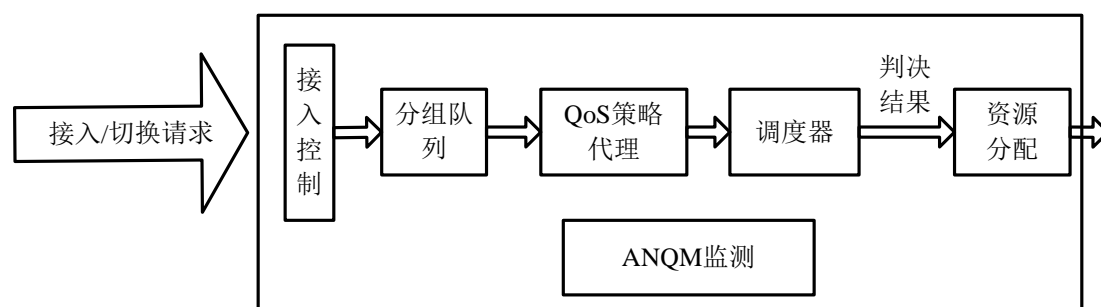


图 4.2 混合业务分组调度框图

QoS 策略代理模块原理框图如图 4.3 所示。

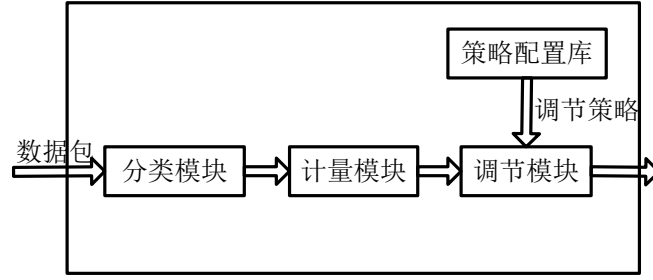


图 4.3 QoS 策略代理原理框图

本文设计的混合业务分组调度模型主要包括 ANQM 监测模块、调度器模块、QoS 策略代理模块。ANQM 监测模块主要用于监测用户接入，调度器的调度状况和对资源分配状况，并分析当前网络状态和业务流情况，保证业务的 QoS。调度器模块用于根据优先级调度相应的业务分组。资源分配模块为排序后的等待传输的队列分配资源。QoS 策略代理模块主要包括分类模块、计量模块、调节模块、策略配置库。QoS 策略代理模块各个部分的功能如下文所述。

分类模块根据数据包特征对数据包进行分类，将数据流分为不同的业务流，包括实时业务流，非实时业务流。本节主要考虑语音、视频、数据等业务。这里用 Q 矩阵代表不同用户混合业务的数据包分类，元素 q_{ij} 代表一个分组队列， i 表示用户， j 表示业务类型。 Q 矩阵的行表示 i 用户发起的不同业务类型，列表示 j 业务类型的不同用户。

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & \cdots & q_{1j} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & \cdots & q_{2j} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & \cdots & q_{3j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ q_{i1} & q_{i2} & q_{i3} & \cdots & q_{ij} \end{bmatrix}$$

计量模块对分类后的业务分组数据流进行业务信息统计，主要包括业务分组进入队列缓存区的入队速率、出队速率、更新时间、业务分组丢弃概率。

调节模块根据分类模块和计量模块提供的分组队列信息和业务流统计信息，从 QoS 策略配置库中读取相应的调度策略，对已接入用户分组队列的调度优先级进行计算，并根据优先级进行排序。

4.3 业务分组队列管理方法

业务分组队列管理方法主要由 QoS 策略代理模块中的分类模块和计量模块两部分组成，通过计量模块计算相关的分组队列长度、缓存区入队速率、更新时间、丢弃的分组数、出队速率等。借鉴了文献^{[54][55]}中的思想，本节设计了业务分组队列管理方法。因为好的业务分组队列管理方法可以提高的网络吞吐量，提高网络带宽利用率，降低网络端到端时延，保证较高的鲁棒性和响应性。通过计

量模块计算的结果，可以用于计算混合业务分组调度优先级。

(1) 缓存区业务分组入队速率

业务分组到达缓冲区时，缓冲区需要根据下式进行决定是否丢弃业务分组，如果决定业务分组入队，则

$$Q(t) < Q_{\max} \quad (4-1)$$

否则，丢弃业务分组。其中， $Q(t)$ 表示现有缓存区队列长度， Q_{\max} 表示缓存区最大队列长度。当每个业务分组到达或者离开缓冲区队列时， $Q(t)$ 会及时进行更新。利用指数平滑的方法能够准确的估计出实时的入队速率，所以当新的业务分组到达缓存区队列时，计算该分组的入队速率具体的公式如（4-2）式所示。

$$r_{in}(t) = (1 - e^{-\Delta T / K}) / \Delta T + e^{-\Delta T / K} r_{in}(t_{pre}) \quad (4-2)$$

其中， $r_{in}(t)$ 为入队速率估计值， ΔT 是更新时间， K 为调节常数， t_{pre} 为前一次估计算法执行时刻。

(2) 时间更新方法

当入队速率大于出队速率，缓冲区的队列长队就会增加，反之，系统就会处于相对平稳状态，缓冲区的分组队列长度需要根据入队速率和出队速率进行调整。更新分组丢弃概率可以有效控制缓冲区分组队列的长度。用 ΔT 表示分组丢弃概率更新时间，其表示如（4-3）式所示。

$$\Delta T = T e^{-\delta |r_{in}(t) - r_{out}(t)|} \quad (4-3)$$

其中 T 为平均的往返时间， δ 为更新时间调整常数， $r_{out}(t)$ 为出队速率估计值。更新分组丢弃概率需要满足（4-4）式。

$$t - t_p > \Delta T \quad (4-4)$$

其中， t 为当前系统时间， t_p 为上次更新分组丢弃概率的时间。当条件不满足时，数据分组丢弃概率不变。

(3) 业务分组丢弃概率

为了解决异构网络中突发数据流导致缓冲区分组溢出的问题，设计分组丢弃概率，缓冲区分组队列会根据分组丢弃概率对分组进行丢弃。缓冲区分组丢弃概率利用缓存区中实时队列长度和最大队列长度，以及估计的入队速率和出队速率作为公式的参数，公式如（4-5）式所示。

$$P(t) = 1 - \theta^{-e(t)} \quad (4-5)$$

其中， $P(t)$ 是缓存区内数据分组的丢弃概率， θ 是调整系数， $e(t)$ 是 t 时刻瓶颈链路的指数。 $e(t)$ 表示如（4-6）式所示。

$$e(t) = e(t_{pre}) + \gamma[|r_{in}(t) - r_{out}(t)| + Q_{max}/Q(t) - 1] \quad (4-6)$$

其中, $r_{out}(t)$ 为出队速率估计值, γ 是调整系数。 t_{pre} 为前一次估计算法执行时刻。缓冲区分组丢弃概率如 (4-7) 式所示。

$$P(t) = 1 - \theta^{-\{e(t_{pre}) + \gamma[|r_{in}(t) - r_{out}(t)| + Q_{max}/Q(t) - 1]\}} \quad (4-7)$$

(4) 缓存区业务分组出队速率

当缓冲区业务分组离开队列时, 计算该分组的出队速率如 (4-8) 式所示。

$$r_{out}(t) = (1 - e^{-\Delta T/K})/\Delta T + e^{-\Delta T/K} r_{out}(t_{pre}) \quad (4-8)$$

其中, $r_{out}(t)$ 为出队速率估计值, ΔT 是更新时间, K 为调节常数, t_{pre} 为前一次估计算法执行时刻。

4.4 混合业务分组调度策略

混合业务分组调度策略存放于 QoS 策略代理模块中的策略配置库。本节设计的混合业务调度策略可以根据异构网络的网络性能及用户业务对分组时延、速率及丢包率的实际值与需求值, 调整优先级权重因子, 从而改变业务分组调度优先级。

为了保证用户业务分组的公平性, 本节中的信道资源分配环节是根据业务分组的调度优先级来进行资源分配, 因此需要计算调度器中所有用户待传分组队列的调度优先级。为了避免两种判决机制带来的不公平性^[50], 本章提出一种统一的判决机制来计算业务分组的优先级, 适合实时与非实时业务分组。分组队列调度优先级函数^[56]可以由 (4-9) 式表示。

$$P_{i,j}(t) = a_j * \frac{t - t_{i,j}}{T_j} + b_j * u(\bar{h}_j - \tilde{h}_{i,j}) * \frac{\bar{h}_j - \tilde{h}_{i,j}}{\bar{h}_j} \quad (4-9)$$

在上表达式中, i, j 分别代表用户和业务分组类型, $P_{i,j}$ 为业务分组调度优先级, a_j, b_j 分别代表传输速率权重因子和吞吐量的权重因子。 \bar{h}_j 是期望吞吐量, $\tilde{h}_{i,j}$ 是实际的平均分组吞吐量。但是, 该调度优先级未考虑丢包率, 把吞吐量作为优先级判决因素不合理。如果需要调度传输速率较慢的业务分组, 需要把传输速率作为判决因素。考虑分组时延, 丢包率两项判决因素, 本节为 HWN 提出一种统一的判决机制来计算业务分组的优先级。在 NAH 算法中, 可将分组队列调度优先级函数表示为 (4-10) 式所示。

$$f(i, j, t) = \arg \max_{i,j} \{w_d f_d(i, j, t) + w_l f_l(i, j, t)\} \quad (4-10)$$

其中, $f_d(i, j, t)$ 、 $f_l(i, j, t)$ 分别表示时延效用函数、丢包率效用函数, 代表用户

对业务分组时延和丢包率的满意程度。 w_d 、 w_l 分别表示时延效用函数和丢包率效用函数对应的权重因子。且满足：

$$w_d + w_l = 1 \quad (4-11)$$

其中， $0 \leq w_d \leq 1$ ， $0 \leq w_l \leq 1$ 。

时延效用函数 $f_d(i, j, t)$ 定义如 (4-12) 式所示。

$$f_d(i, j, t) = \frac{D_{i,j} - T(i, j, t)}{D_{i,j}} \quad (4-12)$$

$$T(i, j, t) = \frac{Q_{\max}}{\frac{r_{in}(i, j, t) + r_{out}(i, j, t)}{2}} = \frac{2Q_{\max}}{r_{in}(i, j, t) + r_{out}(i, j, t)} \quad (4-13)$$

$$f_d(i, j, t) = \frac{D_{i,j} - \frac{2Q_{\max}}{r_{in}(i, j, t) + r_{out}(i, j, t)}}{D_{i,j}} = 1 - \frac{2Q_{\max}}{D_{i,j} * [r_{in}(i, j, t) + r_{out}(i, j, t)]} \quad (4-14)$$

其中， $T(i, j, t)$ 表示用户 i 的 j 类业务分组的实际传输时延， $D_{i,j}$ 表示用户 i 的 j 类业务分组允许的最大传输时延， $r_{in}(i, j, t)$ 表示 i 的 j 类业务分组的入队速率， $r_{out}(i, j, t)$ 表示业务分组的入队速率。

丢包率效用函数 $f_l(i, j, t)$ 定义如 (4-15) 式所示。

$$f_l(i, j, t) = \frac{P_{i,j} - P(i, j, t)}{P_{i,j}} \quad (4-15)$$

其中， $P_{i,j}$ 表示用户 i 的 j 类业务分组允许的最大丢包率， $P(i, j, t)$ 表示用户 i 的 j 类业务分组的丢包率。综上得到，在 NAH 算法中，可将分组队列调度优先级函数表示为 (4-16) 式所示。

$$f(i, j, t) = \arg \max_{i,j} \{ w_d * (1 - \frac{2Q_{\max}}{D_{i,j} * [r_{in}(i, j, t) + r_{out}(i, j, t)]}) + w_l * \frac{P_{i,j} - P(i, j, t)}{P_{i,j}} \} \quad (4-16)$$

在 HWN 中，每个网络的传输性能不一样。根据 ANQM 对不同业务分组的监测结果，QoS 策略代理适当调整权重因子 w_d 、 w_l ，保证更好的 QoS。公式不仅考虑了分组时延，丢包率性能要求，还考虑到网络的实际状况。为不同业务提供优先级权重因子，使得不同业务实际 QoS 水平与对应 QoS 需求成比例，适合混合的实时、非实时业务。因此，保证调度过程中对 QoS 进行实时调整。

4.5 调度策略自适应调节机制

调度策略自适应调节机制主要由混合业务分组调度系统中的 ANQM 模块和

QoS 策略代理模块中策略配置库、调节模块构成。调度策略自适应调节机制根据不同的网络，不同的业务类型，自适应地调节调度策略。

ANQM 监测模块主要用于监测 QoS 数据, 分析当前网络状态和业务流情况, 保证业务的 QoS, 判断数据是否属于当前策略范围。QoS 数据分布领域主要包括用户接入、切换, QoS 策略代理和资源分配。调节模块根据分类模块和计量模块提供的分组队列信息和业务流统计信息, 从 QoS 策略配置库中读取相应的调度策略, 对已接入用户分组队列的调度优先级进行计算, 并根据优先级进行排序。不同业务性能参数如表 4.1 所示。

表 4.1 不同业务性能参数

媒体	应用	对称性	带宽	时延	时延变化	丢包率
语音	Conversational voice	Two-way	4-64 kbit/s	<150ms preferred <400ms limit	<1ms	<3% packet loss ratio(PLR)
	voice messaging	Primary one-way	4-32 kbit/s	<1s for playback <2s for record	<1ms	<3% PLR
	High quality streaming audio	Primary one-way	16-128 kbit/s	<10s	<<1ms	<1% PLR
视频	Videophone	Two-way	16-384 kbit/s	<150ms preferred <400ms limit		<1% PLR
数据	Web-browsing-HTML	Primary one-way	~10 KB	Preferred <2s/page Acceptable <4s	N.A	Zero
	Still image	one-way	<100 KB	Preferred <15s Acceptable <60s	N.A	Zero
	Interactive games	Two-way	<1KB	<200ms	N.A	Zero
	Telnet	Two-way	<1KB	<200ms	N.A	Zero
	E-mail (server access)	Primary one-way	<10 KB	Preferred <2s Acceptable <4s	N.A	Zero
	E-mail (server to server transfer)	Primary one-way	<11 KB	can be several minutes	N.A	Zero

调度策略自适应调节流程如图 4.4 所示：

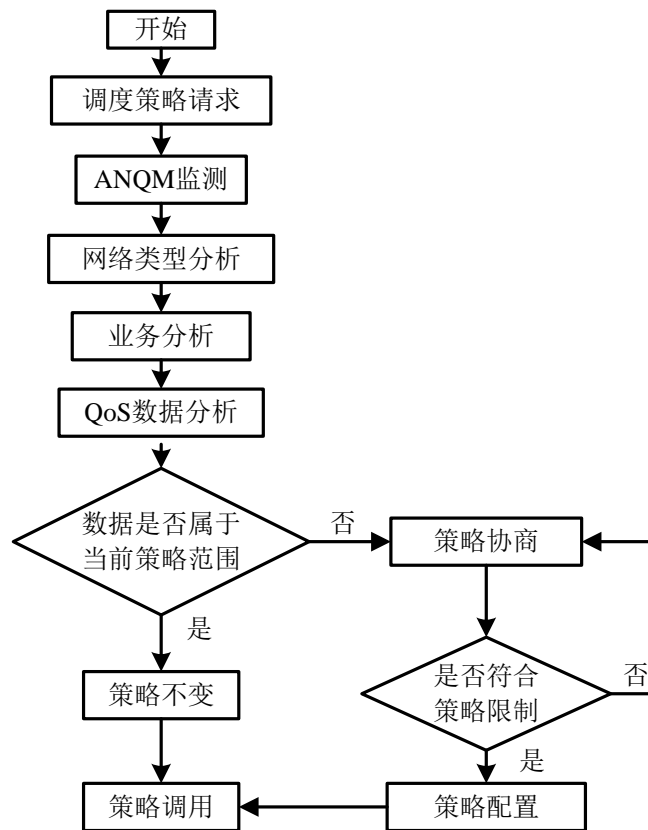


图 4.4 调度策略自适应调节流程

QoS 策略配置首先保证能够传输异构网络的混合业务分组，然后再保证组的业务分组的 QoS。比如，语音业务和数据业务在 2G 网络中传输，语音业务相比数据业务会有更好的 QoS。数据业务的传输速率会比较慢，延时、丢包率会增大。为保证数据业务的 QoS，尤其保证数据业务的完整性，较低的丢包率比较低的延时更重要，因此可以适当增加丢包率权重因子 w_l ，满足 $w_l > w_d$ 。在 4G 网络中，如果忽略费用问题，所有的业务分组一般都会有很好的 QoS。但是，为了保证更好的 QoS，比如公平性等性能指标，考虑混合业务分组的性能特征是很有必要的。对于实时业务，比如语音、视频业务对传输时延要求较高，可以适当提高时延权重因子 w_d ，满足 $w_d > w_l$ 。对于非实时业务，比如数据业务对传输时延要求较低，可以适当降低时延优先级项加权因子 w_d ，满足 $w_d < w_l$ 。这样不仅满足了实时、非实时数据流的 QoS 要求，同时可以提高混合数据流的调度效率。

4.6 信道资源分配策略

HWN 通信系统承载从实时语音、视频，到 Web 浏览、电子商务、视频点播等多种混合业务。人们对于服务质量、业务体验的要求也越来越高。然而 HWN

由于异构性,使得移动通信系统更加错综、复杂、多变,这就使得保障用户业务体验的分组调度及其资源分配成为无线资源管理的重要部分。分组调度算法不仅需要考分考虑分组调度环节,还需要根据优先级为业务分组分配系统资源。

为了更好地分配系统资源,本节设计了信道资源分配机制。该机制由混合业务调度系统中的接入控制模块、ANQM 监测模块和资源分配模块组成。如果 ANQM 监测模块判定当前网络系统资源充足,则允许用户通过接入或切换请求接入系统;否则,拒绝用户接入系统。该信道资源分配机制不仅可以提高分组调度后的资源分配效率,还可以减小缓冲区分组队列长度,有效降低分组等待时延和分组丢弃概率。

在 NAH 算法中,为保证用户业务分组在规定的传输时延范围内顺利传输到达接收者,需要合理分配用户 i 的信道数目。如果用户 i 的 j 类业务分组大小为 $w_{i,j}$,信道传输能力表达式如 (4-17) 式所示。

$$C_i(T) = R_i(t) * T \quad (4-17)$$

其中, $R_i(t)$ 为信道的实时传输速率, T 为资源分配周期。那么为该分组分配的信道数为 (4-18) 式所示。

$$n_{i,j} = \frac{w_{i,j}}{C_i(T)} * \left[\frac{T_j - (t - t_{i,j})}{T} \right]^{-1} \quad (4-18)$$

其中, $t_{i,j}$ 表示用户 i 的 j 类业务分组队列首部生成时刻, t 为调度时刻, T_j 为 j 类业务分组的传输时延。传输用户 i 所有业务分组需要的信道数为 (4-19) 式所示。

$$n_i = \sum_j \frac{w_{i,j}}{C_i(T)} * \left[\frac{T_j - (t - t_{i,j})}{T} \right]^{-1} \quad (4-19)$$

传输队列中所有用户需要的信道数为 (4-20) 式所示。

$$n = \sum_i \sum_j \frac{w_{i,j}}{C_i(T)} * \left[\frac{T_j - (t - t_{i,j})}{T} \right]^{-1} \quad (4-20)$$

设系统资源信道总数为 N_t , 如果

$$(N_t - n) > 0 \quad (4-21)$$

说明信道资源充足, 如果

$$(N_t - n) \leq 0 \quad (4-22)$$

说明信道资源短缺, 系统就暂时拒绝接入新用户, 这样就可保证系统资源的合理利用, 提高用户的 QoS。

4.7 分组调度算法流程

(1) NAH 算法流程图如图 4.5 所示：

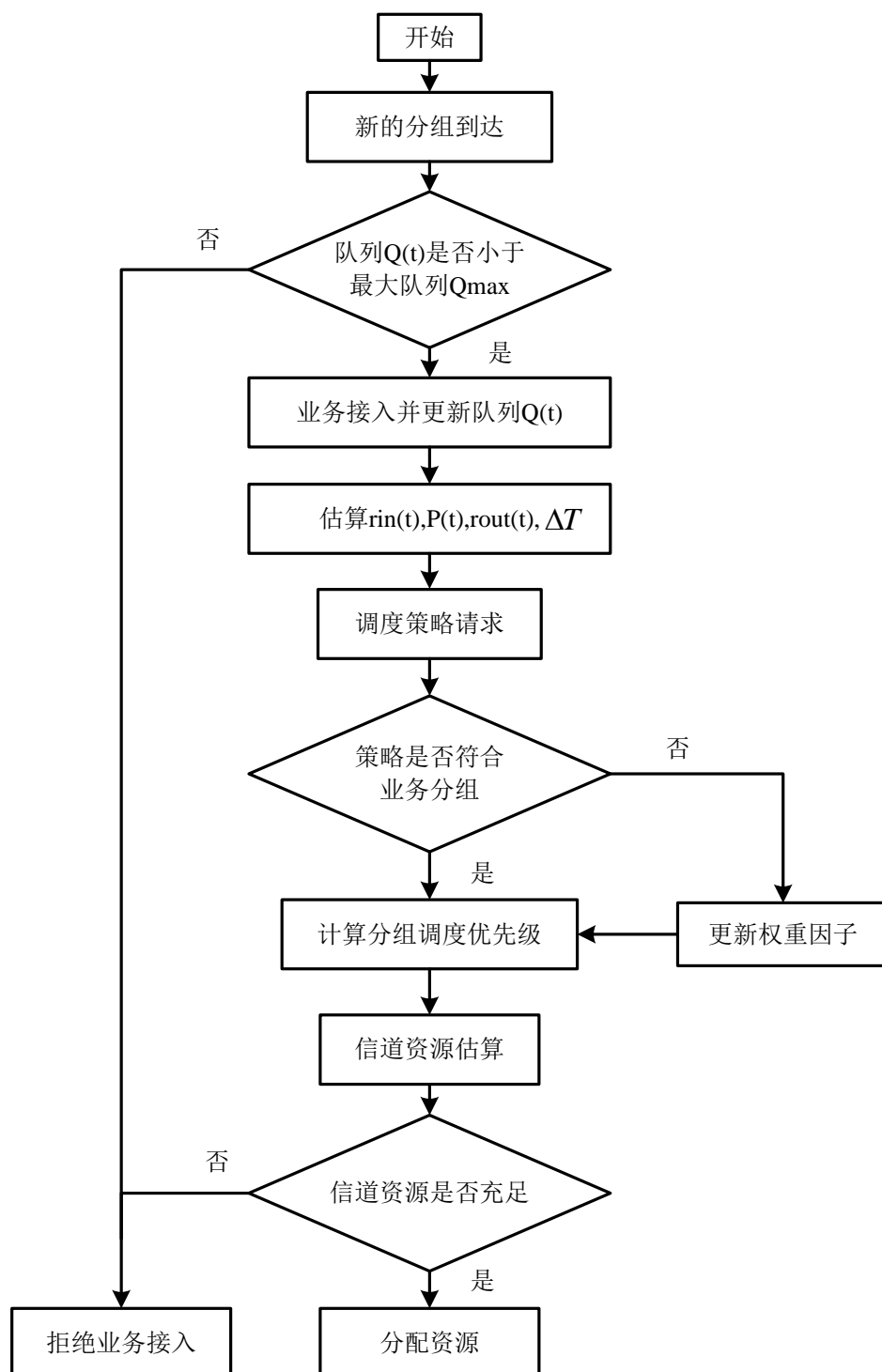


图 4.5 混合业务调度算法流程图

(2) 本节提出的 NAH 算法由下面步骤组成：

Step1 新的业务分组到达，判断队列长度 $Q(t)$ 是否小于最大队列长度 Q_{\max} ，

如果是，业务分组进入队列缓冲区，把业务分组分为实时队列和非实时队列，并更新 $Q(t)$ ；如果否，丢弃该业务分组。

Step2 估计缓冲区入队速率 $r_{in}(t)$ ，更新时间 ΔT ，计算分组丢弃概率 $P(t)$ ，估计缓冲区入队速率 $r_{out}(t)$ 。

Step3 判断当前调度策略是否符合不同网络类型的不同业务分组。如果符合，则调度策略不变；否则，策略调节机制调整对应的 w_d 、 w_l 权重因子，使得不同业务实际 QoS 水平与对应 QoS 需求成比例。

Step4 根据调度优先级公式 (4-16)，计算所有待传分组的调度优先级，然后将分组队列按调度优先级高低排序。

Step5 判断当前传输队列所有用户需要的信道数是否大于系统信道资源总数。如果是，按照分组优先级高低，参与信道资源分配；否则，系统拒绝新用户的接入或切换请求。

Step6 返回 Step5，如果是，系统允许接入新的用户，然后返回 Step1。

(3) NAH 算法伪代码如下：

while new packet i arrived do

if $Q(t) < Q_{\max}$

then update $Q(t)$;

$$r_{in}(t) = (1 - e^{-\Delta T/K}) / \Delta T + e^{-\Delta T/K} r_{in}(t_{pre});$$

if $t - t_{pre} > \Delta T$

$$\text{then } \Delta T = T e^{-\delta |r_{in}(t) - r_{out}(t)|};$$

$$p(t) = p(t_{pre}) + \gamma [|r_{in}(t) - r_{out}(t)| + Q_{\max} / Q(t) - 1];$$

$$P(t) = 1 - \theta^{-p(t)};$$

end if

random $P \sim U[0,1]$;

if $P < P(t)$

then drop packet i;

end if

$$r_{out}(t) = (1 - e^{-\Delta T/K}) / \Delta T + e^{-\Delta T/K} r_{out}(t_{pre});$$

Update $Q(t)$;

```

else
    drop packet i;
if QoS data out default range
    then update  $w_d, w_l$ ;
else
    keep  $w_d, w_l$ ;


$$f(i, j, t) = \arg \max_{i, j} \{ w_d * (1 - \frac{2Q_{\max}}{D_{i, j} * [r_{in}(i, j, t) + r_{out}(i, j, t)]}) + w_l * \frac{P_{i, j} - P(i, j, t)}{P_{i, j}} \};$$


while packet i order by  $f(i, j, t)$  do

    if  $(N_t - n) > 0$ 

        then allocate  $n_{i, j} = \frac{w_{i, j}}{C_i(T)} * \left[ \frac{T_j - (t - t_{i, j})}{T} \right]^{-1}$ ;

    else
        reject packet i access;
    end while
end while

```

4.8 本章小结

针对 HWN 中资源调度问题，本文设计了自适应的混合业务分组调度算法。首先建立了 HWN 混合业务分组调度模型，并设计了业务分组队列的管理方法；然后提出混合业务分组调度策略，并建立了随资源变化动态调整调度策略的机制以及资源分配机制；最后列出了 QoS 保障的 NAH 调度算法流程。该算法可以根据业务类型差异适度调整权重因子，使不同业务实际 QoS 水平与对应 QoS 需求成比例，适合业务处理能力不同的 HWN 系统。

第5章 仿真与分析

5.1 引言

未来的网络是由不同网络接入技术相互融合而成的异构融合网络,这已成为当前研究的共识。垂直切换和分组调度是异构融合网络是一个重要的研究点,其算法性能对终端用户业务获得的 QoS 有重要影响。为了对异构融合网络垂直切换、混合业务分组调度性能进行研究,往往需要进行网络模拟仿真。网络仿真软件是一种建立在计算机上的虚拟网络仿真平台,可以实现对真实的网络环境进行模拟仿真,通过分析实验的数据结果以评价所进行的研究对网络性能的影响,因此网络仿真软件成为网络研究的重要组成部分。相比当前众多的网络仿真工具,NS-2 由于其性能良好、易于扩展,已被广泛用于网络模拟。本章首先介绍 NS-2 仿真平台;然后搭建 HWN 仿真环境,对多模节点进行设计;最后对本文提出的 VHA-TB 算法和 NAH 算法进行仿真分析。

5.2 仿真平台概述

NS-2 (Network Simulator, Version 2)^[57]是一款开源网络仿真软件,起源于加州大学伯克利分校(UC Berkeley)在 1989 年开发的 REAL 网络仿真器,最初是为了方便研究大规模网络以及网络协议交互而开发的。它支持有线和无线 TCP 协议、路由协议、多播协议,当时主要用于仿真各种 IP 网络。因为它是开源的,世界范围内使用软件的网络相关工作人员可以使用和修改,比如添加新的路由协议、仿真元素和模型,使得 NS-2 拥有源源不断的新的源代码和应用实例,用户可以很方便地在现有版本基础上利用源码再次开发。

现阶段NS-2被广泛应用于不同网络环境的仿真,包括有线网络和无线网络,如无线局域网、有线局域网、移动IP网、卫星网和移动Ad hoc网等。同时它拥有路由队列管理模块、业务流量产生器模块、网络传输协议、应用层协议、网络路由协议等,可以实现多种模块的仿真,功能异常强大。另外,NS-2也实现了多播和一些MAC层的协议的仿真,实现了局域网仿真。NS-2模拟离散事件驱动,它在网络架构上,可以模拟路由器、中继、节点;它在网络特性上,可以利用软件中仿真的结果文档(trace),分析一些网络性能指标,包括网络的吞吐量、端到端时延、以及丢包率等。

NS-2 软件包含了 Otcl、Tclcl、Tcl/Tk 等软件包,采用 Otcl 和 C++作为编程语言。C++语言编写的仿真对象由 Otcl 语言进行组装。C++用来实现构件的主要

功能，能够高效率的处理字节、数据包头等信息。Otc1 用来实现面向用户的接口，在短时间内快速的配置和修改网络组件和环境的具体参数以及开发和模拟出所需要的网络环境。如果构造的模块与现有模块差别不大，仅仅是对已有的网络组件进行仿真场景的变化、参数配置的更改来实现仿真模拟的目标，一般只需要写 Otc1 脚本进行设置；如果模块差别较大，即现有的网络组件无法满足仿真模拟的需要，需要建立新的组件或在已有的组件上进行修改扩展，此时需要编写新的 C++、Otc1 部分的程序，从而实现仿真模拟的需求。虽然两者结合功能强大与全面，但是缺点是需要使用者掌握和维护两套代码，难度大大增加。

确定仿真的目标，正确安装 NS-2 仿真软件，保证其中包含的场景的构建能够满足仿真的需求，那么整个仿真过程大致如下^[58]：

(1) 编写 Otc1 脚本。此步骤需要分析现有的组件能否满足仿真的需要，如果满足，就可以直接配置模拟网络的拓扑结构，编写 Otc1 脚本；否则，则需要通过添加或者修改 C++ 组件来创造仿真的条件，重新编译 NS-2 软件，再进行编写 Otc1 脚本。链路的带宽、延迟、丢失策略等基本特征可由此确定。

(2) 通信协议的代理设置。这一步将一个特定的协议和终端设备结合在一起，建立通信流量模型。

(3) 业务量模型参数的配置。此步用来确定网络上业务量的分布情况。

(4) 设置并保存整个仿真信息的 trace 对象。trace 对象会跟踪整个仿真过程，并用 trace 文件记录发生的某些特定类型的事件。

(5) 编写一些辅助功能与模拟结束的时间。Otc1 脚本到此步已经编写完成。

(6) 利用 NS-2 执行 Otc1 脚本。

(7) 仿真结束，分析研究仿真产生的 trace 文件，提取出用户需要的数据，随之用 gnuplot 画出仿真曲线进行综合分析对比。也可以利用 nam 演示动画，直观的看出整个场景的动态变化情况。

(8) 当拓扑结构等仿真场景出现变化时，重新进行模拟分析，编写 Otc1 和 C++ 语句。

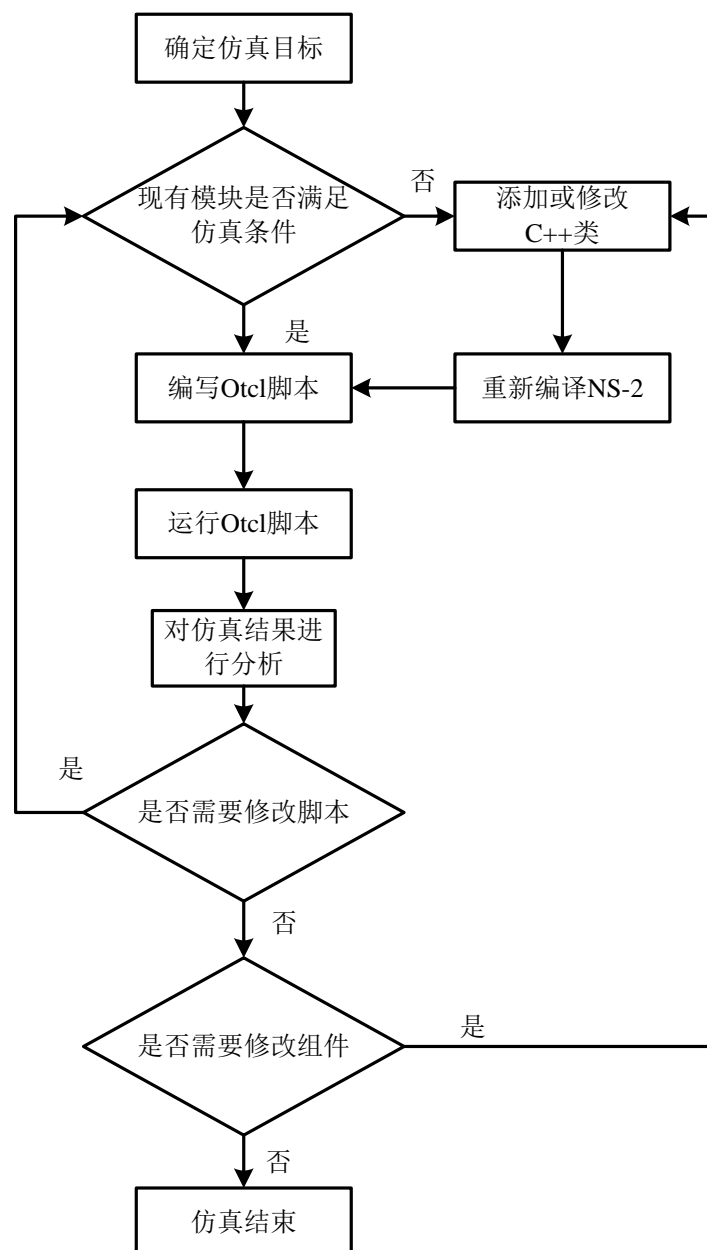


图 5.1 NS-2 仿真过程

5.3 异构无线网络环境搭建

5.3.1 无线网络协议扩展包选择

HWN 可以包含很多不同类型的网络，如 3GPP 提出的 GSM、UMTS、LTE 以及 IEEE 提出的 WiFi 和 WiMax。目前已有多个个人或组织对上述网络类型进行了 NS-2 的模块开发，NS-2 不仅能实现基本 802.11 的部分功能，还能实现别的网络模块，如 Richa Jain 的 GPRS 模块，Pablo Martin 和 Paula Ballester 的 UMTS 模块，欧盟委员会 SEACORN 项目的 EURANE（包含 HSDPA 功能的 UMTS），

美国国家标准技术研究院（NIST）的 WiMax 模块。然而这些网络模块由于开发的作者、时间和目的均不同，所针对的 NS-2 版本也不一样，无法组合起来在同一个 NS-2 版本中使用，更不能组成互通的异构网络。通过 NS2 仿真的基本模块，可以满足用户的基本需求，如果用户添加新的模块或算法，只需要在 C++ 层次编写对应的模块即可完成相应的功能。结合异构网络融合的发展状况和已有 NS-2 无线扩展模块的研究现状，这里以 GPRS、UMTS 和 WLAN 三种典型网络为目标网络，研究 HWN 仿真环境的搭建。

5.3.2 多模节点设计

HWN 环境下的仿真，垂直切换算法、联合资源管理策略等客观上要求 NS-2 中的终端节点可以支持多种通信技术（如 IEEE802.11、UMTS、WiMax 等），而且同一网络拓扑中能够有多种无线网络同时工作并互联互通。NS-2 中已有的功能实现并不支持多模节点（包括 MN），因此需要设计多模无线节点。多接口需要一个节点有多种类型的接口，使终端节点可以访问各种不同的网络或信道。

由于异构网络的异构性，其信道、MAC 机制、甚至路由协议都不相同，如果扩展协议模块，难度较大，而且复杂，同时扩展性也不好。同样，如果通过使用几套并行协议栈和共用一套路由协议来解决多接口的问题，难度也很大，复杂性较高。此外，利用分类器将不同类型的节点组合起来作为虚拟的融合总节点 BindNode，从而具备多接口节点的各个接口。

根据文献^[59]，具体实现思路是，将 GPRS UE 节点、UMTS UE 节点和 WLAN STA 节点的端口分类器出来的数据流接到同一个节点——BindNode 的端口分类器，去掉 GPRS UE、UMTS UE 和 WLAN STA 节点的上层 agent，转而加到 BindNode 上，从而实现了多模终端节点。多模节点必须有切换功能和接收发送包功能，在穿越 HWN 时才能保持正常通信。如图 5.2 所示，如果实现节点接收包的功能，该节点的分类器 Classifier/Port 的 default target_包将被传到 BindNode 的端口分类器；如果实现节点发送包功能，Application 首先会寻找 target_是哪种网络的节点，从而会将该封包传送到那个节点上去。新建多模节点的时候要设置相应的开关，设置方法是通过调用命令 mulitIf 来开多接口属性。将各个端口分类器连接起来，随着切换的发生，BindNode 的 app 的 target 也跟着发生变化，这样多模节点就可以收发多协议数据包了。

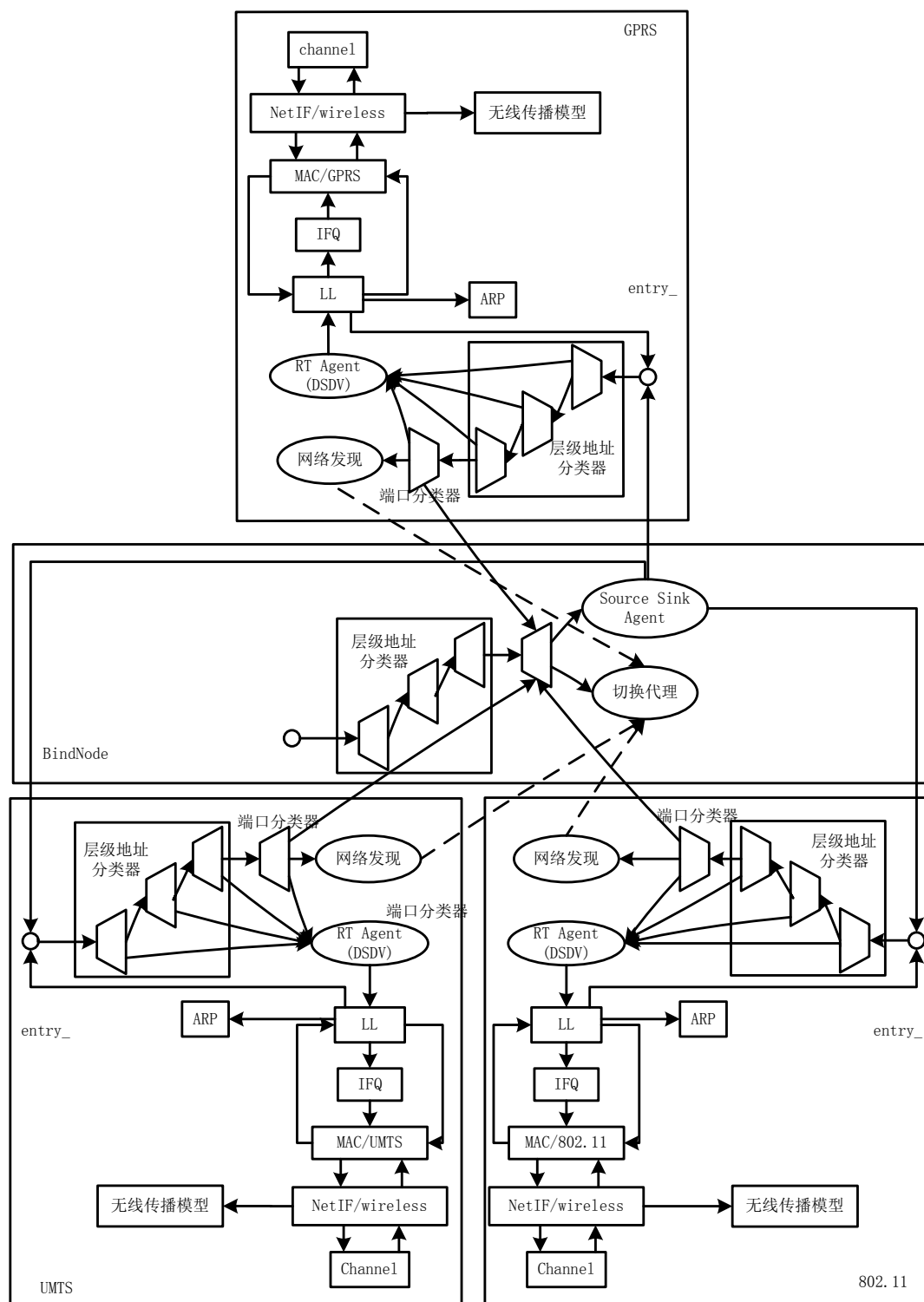


图 5.2 多接口节点模型图

NS-2 中的节点初始化 Tcl 代码:

```

Simulator instproc node-config args {
# 部分省略
if { [info exists multiIf_] && ($multiIf_ == "ON") } {
    set node [eval $self create-BindNode $args]

```

```

    #puts "BindNode with id [$node id] created"
    return $node
}
}

```

提供用户脚本命令的接口，创建多接口节点的 Tcl 函数如下：

```

Simulator instproc create-BindNode args {
    $self instvar Node_
    set node [eval new BindNode $args]
    # added to the list of nodes in C ++
    $self add-node $node [$node id]
    # set node id in C++
    $node nodeid [$node id]
    $node set ns_ $self
    $self check-node-num
    return $node
}

```

以上过程初始化了多模节点，在脚本中的使用方法是：

```

$BindNode add-interface-node $iface1
$BindNode add-interface-node $iface2

```

以下为添加指定的接口（绑定指定节点），注册其端口分类器

```

BindNode instproc add-interface-node { ifaceNode } {

```

```

    $self instvar dmux_ address_

```

多接口接收包对应的 Tcl 函数如下：

```

MultifaceNode instproc add-interface-node { ifaceNode } {

```

```

    $self instvar dmux_ address_

```

```

    #add a port classifier to connect all the ifaceNodes

```

```

    if{ $dmux_="" } {

```

```

        set dmux2_[new Classifier/Port]

```

```

        $self install-demux $dmux2_

```

```

    }

```

```

    if{ [$ifaceNode set dmux_]="" }{

```

```

        set tmp[new Classifier/Port]

```

```

        $ifaceNode install-demux $tmp

```

```

    }

```

```

    #connect the ifaceNode dmux_defalut target to MultifaceNode

```

```
[$ifaceNode set dmux_] default target $dmux_
```

```
$self register $ifaceNode
```

```
}
```

多接口发送包对应 Tcl 函数如下：

```
MultifaceNode instproc attach-agent{home_agen ifacenode{port''}} { }
```

```
$self attach $home_agen $port
```

```
#attach the home_agen to ifacenode entry in the tcl, but when handover occurs
```

```
#the home_agen may be change to other ifacenode entry
```

```
$home_agen target[$ifacenode entry]
```

```
}
```

异构网络必然带来垂直切换的问题，为此要专门设计一个切换代理模块和网络发现模块。切换代理和网络发现模块都安装在 BindNode 节点上。切换代理直接感知底层参数变化，从而判断是否要进行切换。切换代理对底层事件的感知，如 MAC 层丢包，Beacon 信号丢失，信号强度变弱等，可以用如下的流程实现：

- 1) MAC 层接收函数 recvBeacon(Packet *p);
- 2) MAC 层调用 send_link_detected 函数，将消息传送到本地切换代理；
- 3) 本地切换代理调用函数 recv_event(link_event_t e, void * data);
- 4) 调用函数 process_link_detected ((link_detected_t*)data)将消息传送到本地切换代理；
- 5) 本地切换代理调用 process_link_detected 函数；
- 6) 本地切换代理调用 mih_->mih_configure_link (this, mih_->getID(), req)切换；
- 7) 调用函数 link_connect(config->linkIdentifier.macPoA)连接到对应基站或 AP；
- 8) 本地 MAC 层调用 sendAssocRequest(macPoA)，做基站相关连接；
- 9) 基站侧接收到 MAC 层管理帧调用 recvAssocRequest 函数。该函数调用 sendAssocResponse(src, cl)函数发送响应；
- 10) 终端接收 MAC 层调用：recvAssocResponse 函数，该函数产生一个消息；
- 11) 调用 send_link_up (addr(), src, old_bss_id_)，至此底层链路接通，等待 prefix 信号的到达便可以发起切换；
- 12) 切换代理调用相应的处理消息：process_link_up 函数（打印出相应的 MAC 层 UP 信息）。

5.4 基于业务类型的垂直切换算法仿真

5.4.1 仿真场景设置

异构网络仿真场景由 X, Y, Z 三种网络构成, 分别代表 2G、3G、WLAN。基于业务类型的垂直切换仿真场景如下图所示:

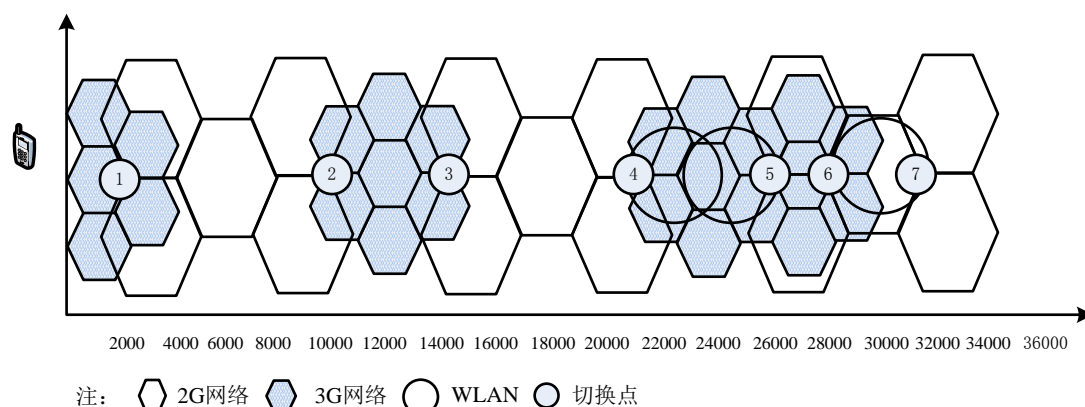


图 5.3 垂直切换仿真场景图

为了仿真切换, 让 MN 快速移动, 以 20m/s 做匀速运动, 横穿如图 5.3 所示的异构网络场景, 总路径 36000 米, 1800 秒。为了区分实时业务和非实时业务各自的切换效果, 仿真分别设置三种场景, 其一, 全程使用实时业务; 其二, 全程使用非实时业务; 其三, 全程既有实时业务也有非实时业务。在第三种场景中, 节点在初始阶段使用实时业务 1, 在 12000 米处开始重新使用非实时业务 1, 在 26000 米处开始使用实时业务 2, 在 28000 米处开始重新使用非实时业务 2。

为了模拟不同规格的无线网来实现混合业务分组调度算法的环境, 可以通过修改不同接入网络的参数。网络参数配置如表 5.1 所示。

表 5.1 网络参数配置

网络类型 参数类型	X 网络	Y 网络	Z 网络
信道	Wireless Channel	Wireless Channel	Wireless Channel
传播模型	TwoRayGround	TwoRayGround	TwoRayGround
网络接口	WirelessPhy	WirelessPhy	WirelessPhy
覆盖范围半径	2000m	1000m	250m
带宽	200Kbps	120Mbps	11Mbps
天线	OmniAntenna	OmniAntenna	OmniAntenna

算法仿真参数如表 5.2 所示。

表 5.2 算法参数配置

参数名称	参数值
$P=(p_1, p_2, p_3)$	(0.1, 0.4, 1)
$W1=(w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6)$	(0.24, 0.27, 0.27, 0.1, 0.1, 0.02)
$W2=(w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6)$	(0.1, 0.27, 0.06, 0.27, 0.1, 0.2)
Dr_th	100ms
Dn_th	2s
sample internal	3 sec
RSS _{th}	-90dBm
$Q=(q_1, q_2, q_3)$	(1, 0.4, 0.1)

5.4.2 性能评价指标

(1) 业务时延(Delay)

业务时延表征了数据包在网络上传输快慢的问题，它包括路由查找延迟、数据包排队延迟，传输延迟和重传延迟等，反映了链路的有效性问题的，对于语音传输有着重要影响。其中，网络类型和结构对业务时延影响最大。业务时延等于接收到数据包的时间减去发送数据包的时间。

(2) 丢包数 (Packet Loss Rate)

由于网络切换等原因，数据包在传输过程中出现被丢弃现象。丢包个数与发送数据包个数的百分比则等于丢包率。

(3) 切换次数 (Handoff Times)

切换次数就是在一个时间段里从当前网络类型切换到不同网络类型的次数。切换算法的有效性和可靠性一般都是通过切换次数来判断。如果在一个固定的异构网络环境下，多接口节点的切换次数越少，说明切换算法越优，反之，切换算法越差。

(4) 垂直切换掉话率(Vertical Handoff Call Dropping Probability)

掉话率指的是掉线的呼叫数量与全部垂直切换呼叫数量的比值，比值越小算法性能越好，说明垂直切换掉线的呼叫数量越少。

5.4.3 结果分析

为了验证本文提出的切换算法的正确性，利用场景设置中的第三种场景，移动节点穿越仿真场景的全程，实时业务和非实时业务共存。通过仿真，多接口节点业务时延如图 5.4 所示。

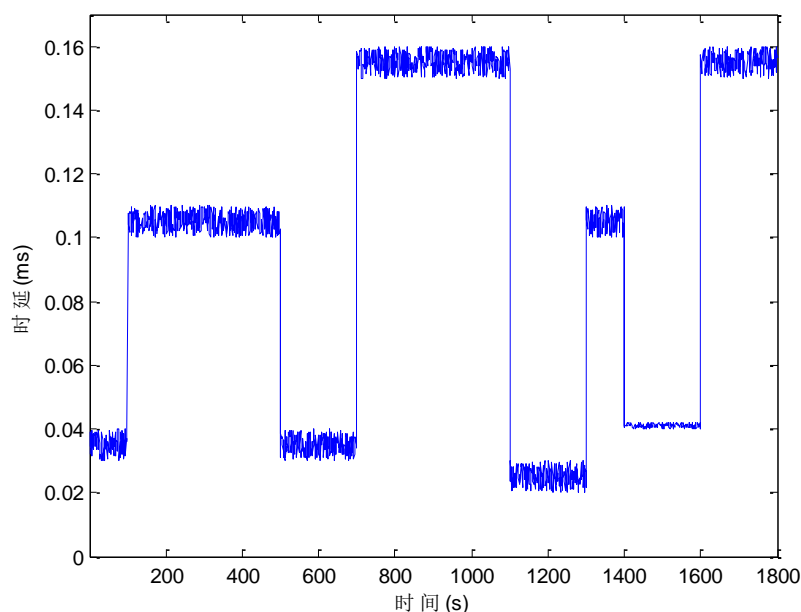


图 5.4 多接口节点业务时延

由图 5.4 可知, 时延在不同时间阶段呈波动变换的, 说明多接口节点在横穿仿真设置的异构网络场景过程中, 业务时延随网络变换而改变。时延曲线在时间点 100s, 500s, 700s, 1100s, 1300s, 1400s, 1600s 出现较大波动, 因为多模节点在这些不同的时间点上发生了切换, 不同网络的带宽资源是不一样的, 从而时延是有明显区别的。

多接口节点切换时间、切换位置、移动节点使用的实时业务和非实时业务发生切换的过程如下所述:

切换 1: 移动节点使用实时业务 1, 检测到新信号, 在 100s, 2000m 处由 3G 切换到 2G;

切换 2: 移动节点使用实时业务 1, 当前网络信号变弱, 在 500s, 10000m 处由 2G 切换到 3G;

切换 3: 移动节点使用非实时业务 1, 当前网络信号变弱, 在 700s, 14000m 处由 3G 切换到 2G;

切换 4: 移动节点使用非实时业务 1, 检测到新信号, 在 1100s, 22000m 处由 2G 切换到 WLAN;

切换 5: 移动节点使用实时业务 2, QoS 需求改变, 在 1300s, 26000m 处由 WLAN 切换到 2G;

切换 6: 移动节点使用非实时业务 2, QoS 需求改变, 在 1400s, 28000m 处由 2G 切换到 WLAN;

切换 7: 移动节点使用非实时业务 2, 当前网络信号变弱, 在 1600s, 32000m 处由 WLAN 切换到 2G。

为了验证本文提出的切换算法的有效性, 利用仿真场景中的前两种场景, 全

程分别使用实时业务和非实时业务。本文利用 1 个 MN 折返运动 2 个来回穿越仿真场景 4 次。对文献^[51]中 VHA-FC 算法和本文提出的 VHA-TB 算法进行掉话率的对比和评估。图 5.5 和图 5.6 分别为实时业务和非实时业务对应的掉话率。由图可知,实时业务和非实时业务的平均掉话率都有所降低,这和本文在 VHA-TB 算法中加入了区分业务的判决时延门限阈值有关。

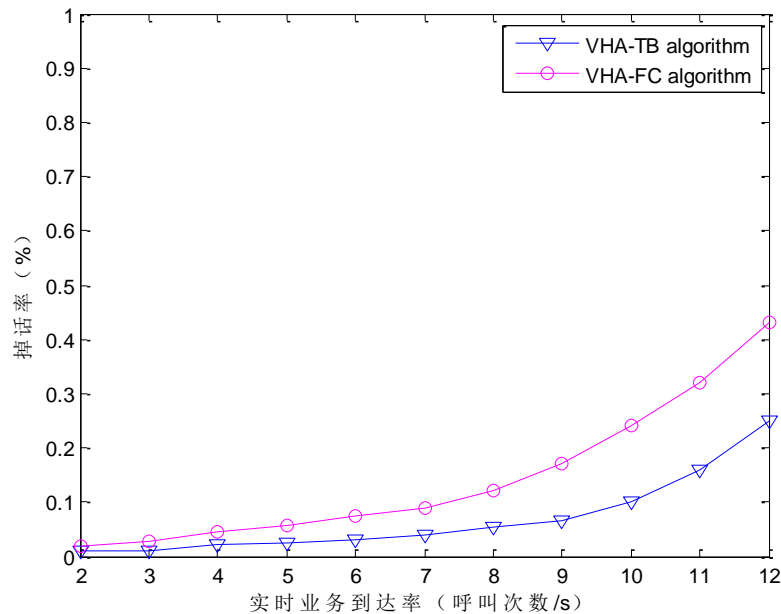


图 5.5 实时业务掉话率比较

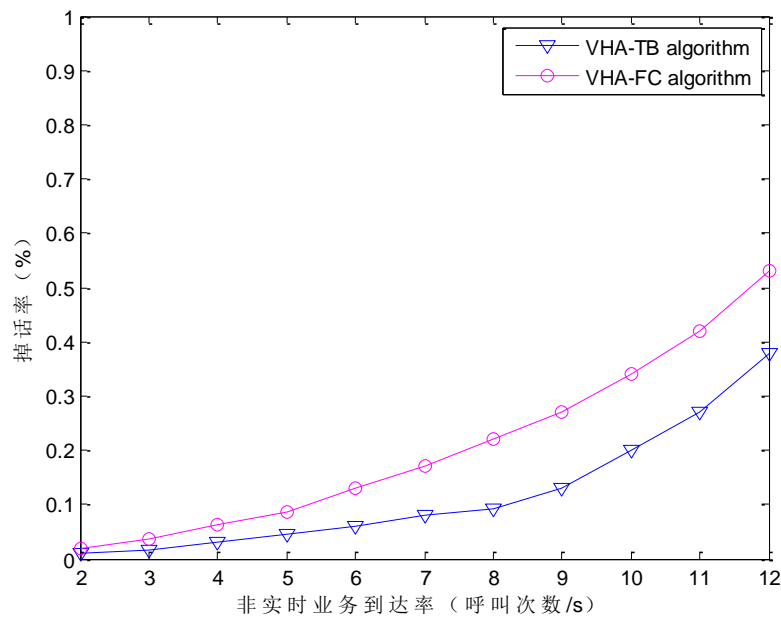


图 5.6 非实时业务掉话率比较

为了验证本文提出的切换算法的可靠性,使用仿真场景中的第三种场景,全

程既有实时业务，也有非实时业务。为了验证切换过程中的丢包率，分别利用不同数目 MN 折返运动 2 个来回穿越仿真场景 4 次。图 5.7 为多模节点在切换过程中的丢包率，由图可以看出，多接口节点在切换过程中丢包较少，说明数据传输基本没有中断。

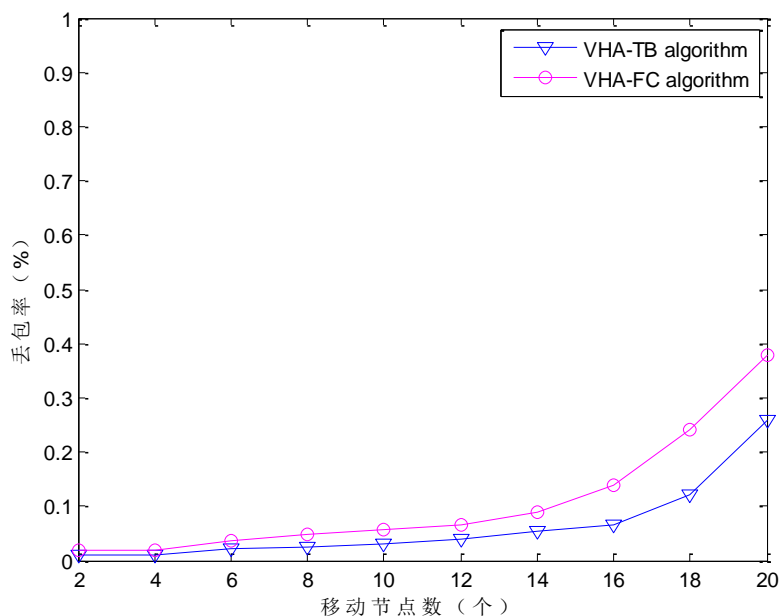


图 5.7 混合业务丢包率比较

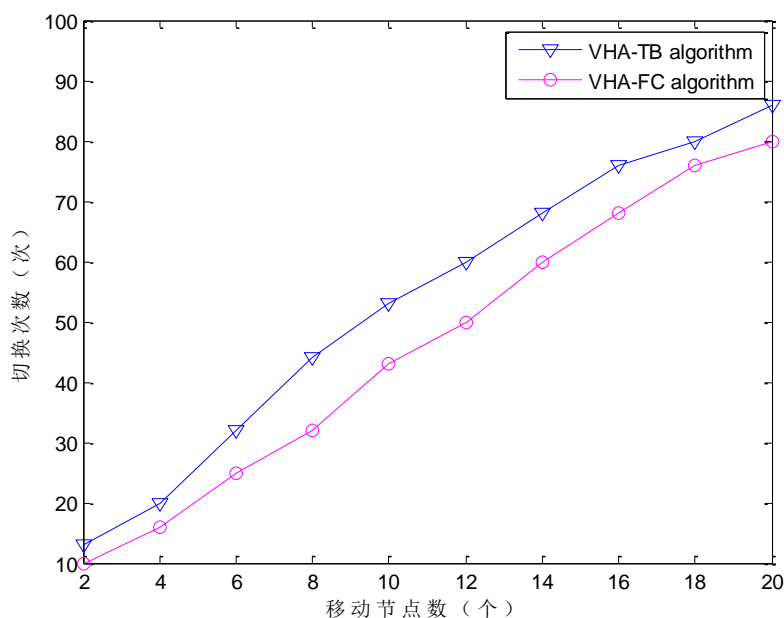


图 5.8 混合业务切换次数比较

另外，扩大仿真场景，利用不同数目的 MN 折返运动 5 个来回穿越仿真场景 10 次。设不同数目的 MN 均匀分布，自由移动。分别用 VHA-FC 算法和本文提

出的 VHA-TB 算法对切换次数进行比较分析。图 5.8 为本文提出的 VHA-TB 算法与 VHA-FC 算法在切换次数上的比较图。由图可知，本文算法发生切换的次数要低。文献^[51]的切换判决算法，10 个移动节点发生切换的平均次数是 55.2 次，本文中提出的垂直切换判决算法，10 个移动节点发生切换的平均次数是 44.3 次。

以上仿真的结果可以看出，VHA-TB 算法在切换过程中丢包较少，数据传输基本没有中断，掉话率降低。由于不同类型的业务通信质量得到明显提升，降低了网络切换频率，因此平均切换次数减少。这与本文提出的算法中区分业务类型有关。实时业务对实时性有很高的要求，对网络的要求侧重于接收信号强、网络带宽大和网络时延短；非实时业务要求侧重网络带宽大，丢包率小及用户偏好。算法引入一个判决值以区分各切换指标的重要性，同时针对业务类型引入区分业务的切换时延阈值。

5.5 自适应的混合业务分组调度算法仿真

5.5.1 仿真场景设置

异构网络仿真场景由 X, Y, Z 三种网络构成，分别代表 2G、3G、WLAN。为了减少仿真复杂度，选取 3G 为用户所在位置区的最优网络，2G、3G、WLAN 的网络用户向 3G 网络切换。仿真初始，多接口节点均匀分布在 2G、WLAN 的网络中心小区内，这些节点向 3G 所在区域移动，其初始移动方向随机选取，节点以 20m/s 的速度移动，轨迹服从随机移动模型。每 10s，以 0.3 的概率变换其移动方向，新的移动方向在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 内随机选取，仿真时间 250s。

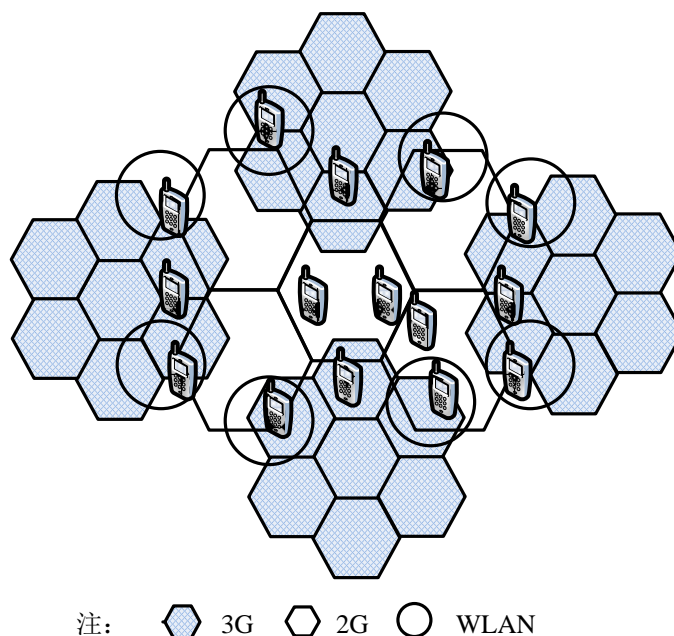


图 5.9 混合业务分组调度仿真场景图

本次仿真采用两类典型业务，包括会话类和交互类。2G、3G 网络有会话类业务、交互类业务，WLAN 网络有交互业务。语音业务、可视电话等会话类业务是实时业务，对传输时延要求很高；而网页浏览、下载等交互类业务是非实时业务，这类数据业务对时延的要求相对较低，但是对分组丢包率的要求相对较高。

为了模拟不同规格的无线网来实现混合业务分组调度算法的环境，可以通过修改不同接入网络的参数。网络参数配置如表 5.3 所示。

表 5.3 网络参数配置

网络类型 参数类型	X 网络	Y 网络	Z 网络
信道	Wireless Channel	Wireless Channel	Wireless Channel
传播模型	TwoRayGround	TwoRayGround	TwoRayGround
网络接口	WirelessPhy	WirelessPhy	WirelessPhy
覆盖范围半径	2000m	1000m	250m
带宽	200Kbps	120Mbps	11Mbps
天线	OmniAntenna	OmniAntenna	OmniAntenna

算法仿真参数如表 5.4 所示。

表 5.4 算法仿真参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
仿真用户数	20,40,60,80, 100,120,140, 160, 180,200	调度周期	5ms
会话类最大延时	50ms,400ms	会话类最大丢包率	$10^{-1}, 10^{-2}$
交互类最大延时	2s,3s,1s	交互类最大丢包率	$10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-2}$
会话类时延加权因子	0.8	会话类丢包加权因子	0.2
交互类时延加权因子	0.3	交互类丢包加权因子	0.7
缓冲区最大队列长度	2000Byte		

5.5.2 性能评价指标

对于混合业务分组调度算法，从以下几个主要方面进行性能评估。

(1) 平均端到端时延

平均端到端时延是数据产生以后通过网络发送到目的节点成功被接收所花费的平均时间，定义公式如（5-1）式所示。

$$AvgD = \frac{1}{n} \sum_{\lambda=1}^n \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (tr_i - ts_i) \quad (5-1)$$

其中, n 为节点总数, λ 为节点数, i 是发送数据的编号, N 是成功传输的数据总数, tr_i 是接收节点成功接收数据的时间, ts_i 是发送节点发出数据的时间。

(2) 平均分组丢包率

分组丢包率是丢包个数与发送数据包个数的百分比, 定义公式如 (5-2) 式所示。

$$AvgP = \frac{1}{n} \sum_{\lambda=1}^n \frac{p_s - p_r}{p_s} \quad (5-2)$$

p_s 为节点发送的数据包总数, p_r 为目的节点成功接收的数据包总数, n 为节点总数, λ 为节点数。

(3) 平均吞吐量

平均吞吐量是单位时间通过网络链路成功传输的数据总量, 定义公式如 (5-3) 式所示。

$$T_i(t) = \sum \frac{S_i(t)}{t_i} \quad (5-3)$$

其中, $T_i(t)$ 表示吞吐量, $S_i(t)$ 表示成功传输的数据总量, t_i 表示单位时间。

5.5.3 结果分析

为了验证本文提出的NAH算法的正确性, 采用100个发送节点以不同的发包率向100个目的节点分别发送实时业务数据包和非实时业务数据包。改变权重因子, w_d 、 w_l 的取值决定了时延和丢包在性能因子中所占的比重。 w_d 取值越大, w_l 取值越小, 调度器选择调度分组越倾向于实时业务; 反之则越倾向于非实时业务。实时业务重要的QoS指标是时延, 非实时业务重要的QoS指标是丢包率, 因此, 分别对实时业务和非实时业务进行仿真。

实时业务不同 w_d 、 w_l 取值下NAH算法平均端到端时延如图5.10所示。随着源节点发包率不断增加, 在 $w_d = 0.8$, $w_l = 0.2$ 时的平均端到端时延明显低于 $w_d = 0.2$, $w_l = 0.8$ 时的平均端到端时延。

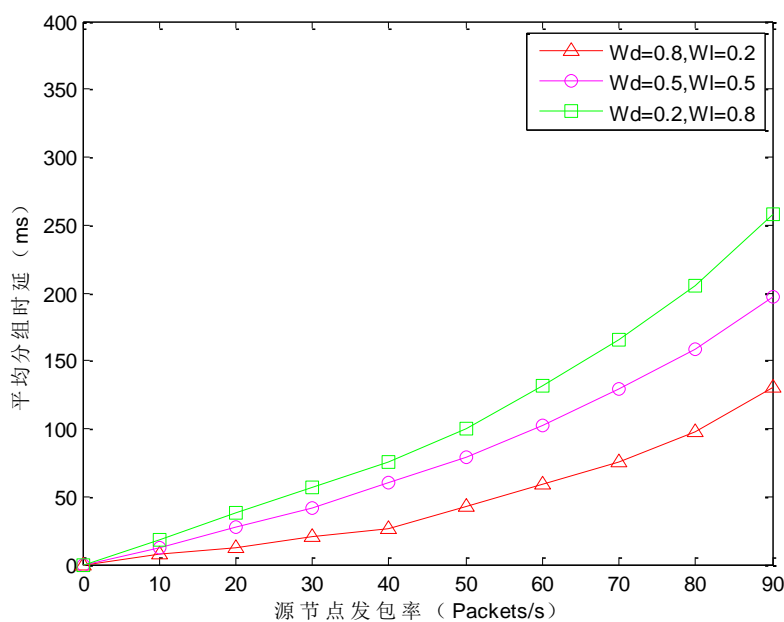


图5.10 不同 w_d w_l 取值下实时业务平均分组时延比较

非实时业务不同 w_d 、 w_l 取值下NAH算法平均分组丢包率如图5.11所示。随着源节点发包率不断增加，在 $w_d = 0.3$ ， $w_l = 0.7$ 时的平均分组丢包率明显低于 $w_d = 0.7$ ， $w_l = 0.3$ 时的平均端到端时延。

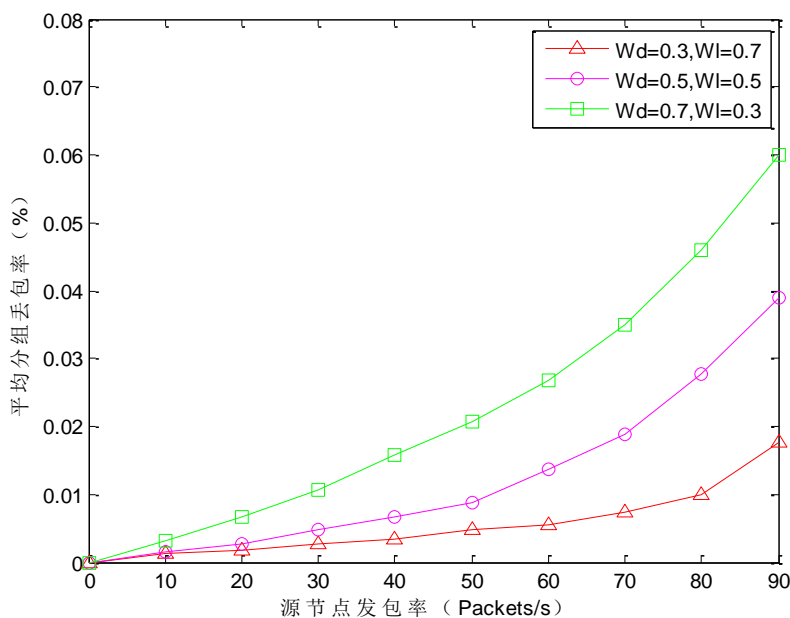


图5.11 不同 w_d w_l 取值下非实时业务平均分组丢包率比较

通过以上仿真结果表明：NAH算法实现了混合业务分组的动态调度，在保证网络连通性的前提下，合理的解决了混合业务分组调度不合理情况，很好的适用

于HWN环境，显著的增加了网络的性能。综合考虑缓冲区队列分组的时延和丢包率情况，才能使调度分配更合理，网络性能更好。

为了验证本文提出的NAH算法的有效性和可靠性，分别采用20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200不同数目的发送节点以相同的发包率向目的节点同时发送实时业务数据包和非实时业务数据包。

混合业务在NAH算法下平均分组丢包率如图5.12所示。随着系统业务负荷的增加，PF和M-LWDF算法在混合业务下的平均分组丢包率以较快的速度上升，而NAH算法则能在同等条件下使平均分组获得较小的丢包率，优于TF-RNS算法。

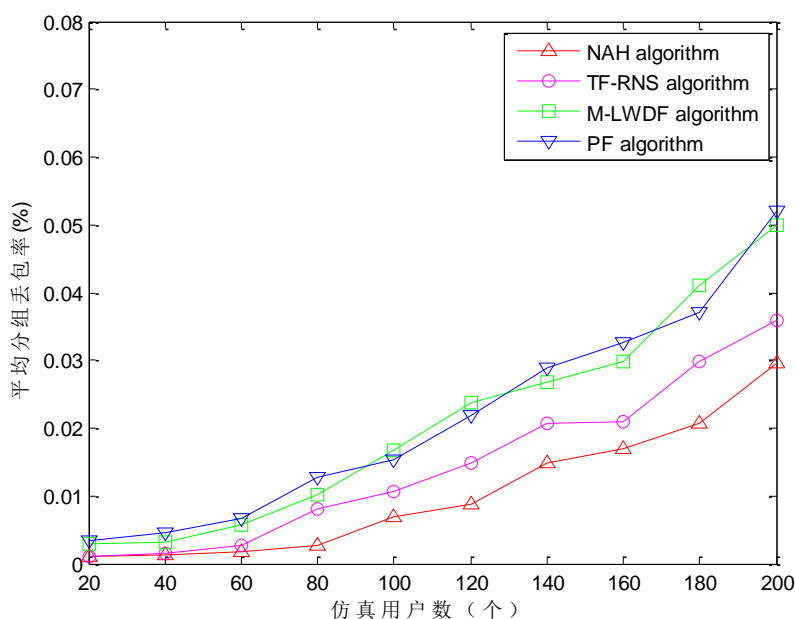


图 5.12 混合业务下用户平均丢包率

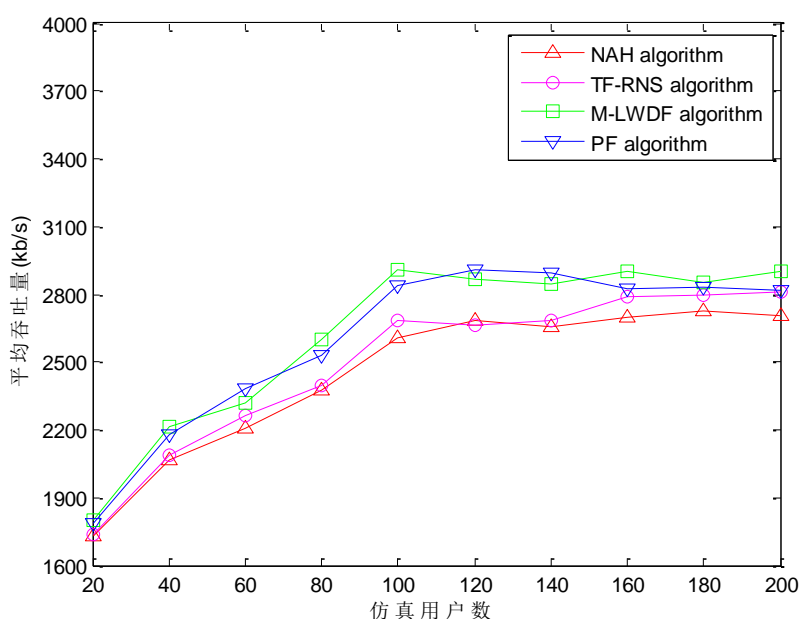


图 5.13 混合业务下用户平均吞吐量

混合业务在NAH算法下平均吞吐量如图5.13所示。在起初阶段由于网络竞争不激烈，四种算法的用户平均吞吐量差不多。随着系统用户数的增加，NAH算法和TF-RNS算法的平均吞吐量明显劣于PF算法和M-LWDF算法。由于NAH算法增加了权重因子，使得实时业务与非实时业务实际获得的QoS与QoS需求成比例，同时兼顾了实时业务与非实时业务，保证了用户的公平性。

混合业务在 NAH 算法下平均端到端时延如图 5.14 所示。从图中可以看出 NAH 算法在不同系统负荷下获得较小的平均分组传输时延。由于吞吐量减少，业务分组在等待调度时就会处在较短的队列中，减少了业务分组的排队时间，这时整个网络的时延将大大减低。同 PF 算法，M-LWDF 算法和 TF-RNS 算法相比较，NAH 算法获得的平均传输时延随系统负荷变化的影响较小。

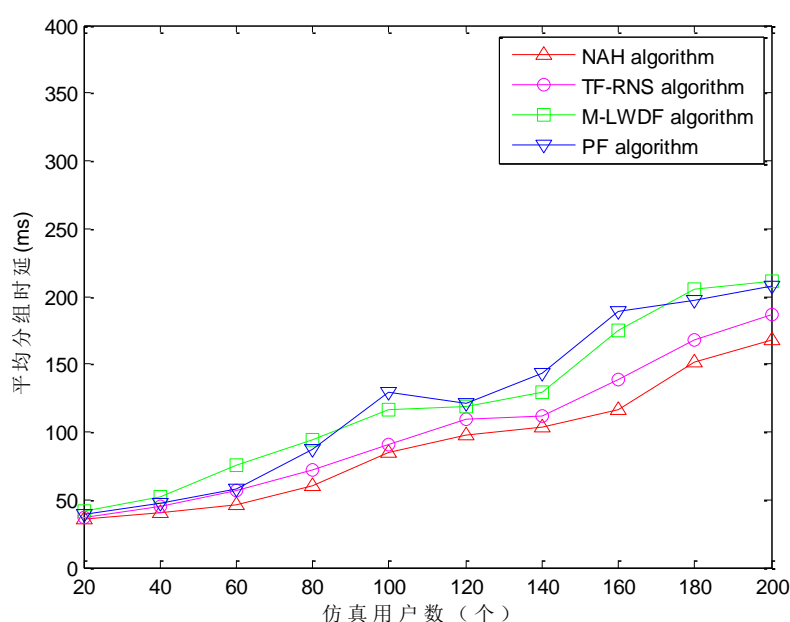


图 5.14 混合业务平均分组时延

从以上仿真结果可知，同现有的 3 种基准调度算法 PF 算法，M-LWDF 算法和 TF-RNS 算法相比较，NAH 算法能为业务提供较低的时延和丢包率保障，虽然以牺牲吞吐量为代价，但是保证了用户的公平性，保证了用户的 QoS。但是在异构网络大量业务数据的情况下，提高业务 QoS 来满足用户需求比提高吞吐量导致业务 QoS 下降更重要。对于混合业务应用，PF 算法是针对非实时业务的调度，而 M-LWDF 算法是针对实时业务的调度，两者并没有根据混合业务 QoS 差别提供区别的调度优先级，对于这 2 种分组调度算法来说，其调度机制分别对实时业务与非实时业务减少了服务时间，因而易造成具有较高 QoS 要求的业务质量得不到可靠保障，而较低 QoS 要求的业务被分配过多的资源，引起资源分配上的不公平。TF-RNS 算法虽然根据混合业务 QoS 差别提供区别的调度优先级，但是调度的二级判决机制较复杂。而 NAH 调度算法可以根据业务 QoS 要求对所获得服务质量做出实时调整，更好地为业务提高 QoS 保障。

5.6 本章小结

本节首先介绍了 NS-2 网络仿真工具，包括其优点及进行网络模拟仿真的使用方法与过程；然后介绍了搭建 HWN 环境需要选择的无线网络协议扩展包，并对多模节点进行设计，进而实现节点的网络切换功能；接着对基于业务类型的垂直切换算法和自适应混合业务分组调度算法进行仿真，以验证算法的正确性及其性能的优越性和可靠性。通过仿真结果表明：本文提出 VHA-TB 算法比文中对比的 VHA-FC 算法在掉话率、丢包率和切换次数上都有所减小，这是由于本文提出的算法中区分了不同业务类型的 QoS 指标的重要程度，同时加入了区分业务类型的切换判决时延阈值。另外，仿真结果表明本文提出的 NAH 算法比现有的 M-LWDF 算法，PF 算法和 TF-RNS 算法在时延、丢包率性能上有所优化，这是由于本文基于队列管理方法建立分组时延和丢弃概率效用函数并分别赋予权重因子计算出调度优先级，使不同业务实际获得的 QoS 水平与对应的 QoS 需求成比例，保证了不同业务的公平性。但是，吞吐量有所降低。在异构网络大量业务数据的情况下，提高业务 QoS 来满足用户需求比提高吞吐量导致业务 QoS 下降更重要。

第6章 总结与展望

6.1 全文总结

随着网络技术的快速发展，未来网络将是异构融合网络。服务用户的要求逐渐智能化，宽带化和个性化。为了保证并提高网络服务质量，未来异构网络的融合趋势为通信行业的各项研究工作带来了许多新的机遇和挑战。而异构无线资源管理技术，包括垂直切换技术，资源调度技术，作为异构网络融合中的关键技术，成为了各类网络融合方案中研究的重点问题。

本论文对异构网络环境下的无缝垂直切换机制以及切换后异构资源的调整和分配进行了深入研究。论文主要完成的工作有：

(1) 在分析现有典型垂直切换算法不足的基础上，为降低掉话率，保证传输质量，提高资源利用率，同时保证用户的满意度，研究了 HWN 基于业务类型的垂直切换问题。本文提出的 VHA-TB 算法首先对目标网络的信号强度进行预判决，减少系统切换开销；然后利用对实时、非实时业务 QoS 指标及网络的满意度计算出垂直切换判决值，从而区分不同业务类型对网络的切换选择；同时针对实时业务和非实时业务，引入不同的切换时延门限阈值，保证无缝切换。该算法保证了不同业务的公平性，同时可以避免切换导致的服务等待和掉话现象。同时，该算法灵活，适用于不同的业务。仿真结果表明，本文提出的 VHA-TB 算法和 VHA-FC 算法相比，在切换丢包率和掉话率方面具有明显的优势，切换次数下降，在提高资源利用率的同时可以保证用户的满意度。

(2) 在分析现有分组调度算法不足的基础上，本文提出了 NAH 算法，适合 HWN 混合业务调度。在该分组调度方案中，本文设计了 HWN 系统调度模型；然后基于缓冲区队列管理方法提出了 QoS 保障的 NAH 调度算法；设计出随着资源变化动态调整调度策略的机制，可以根据网络性能差异适度调整权重因子，使不同业务实际 QoS 水平与对应 QoS 需求成比例，适合业务处理能力不同的 HWN 系统；最后利用信道资源分配情况来控制业务接入或切换请求。通过仿真结果可以看出，本文提出的 NAH 调度算法和现有的 M-LWDF 算法，PF 算法和 TF-RNS 算法相比，在分组时延，分组丢包率方面都有较好地改善，可以避免混合业务中分组调度的不公平现象及系统资源浪费，提升了系统性能。

6.2 展望

随着通信技术快速发展，不同网络技术融合在一起构成异构网络是未来通信网络发展的趋势。本文针对 HWN 资源管理的部分问题做了研究，但是，这些方

法还不能高效、可行地应用于 HWN 环境中，异构无线资源管理方面仍然有较多问题需要解决。

切换判决算法还要解决以下问题：

（1）由于不同接入网络往往被不同的网络运营商拥有，网络间的切换会涉及到运营商间的利益，因此，还需要综合考虑不同接入网络的认证、安全机制等。

（2）移动终端处于运动变化中，切换判决算法需要考虑对终端能量消耗的问题，如果以节能的方法评估可接入网络，或者对切换算法进行评估，对一个电池有限的终端设备意义较大。

HWN 资源管理不能仅仅考虑垂直切换问题，还要考虑切换前后异构资源的调整和分配，保证系统的性能。在 HWN 资源调度算法的研究中，本论文着重针对网络层性能（例如分组丢包率、分组传输时延等）的提高，对分组调度算法进行了设计，但是，分组调度算法还要解决以下问题：

（1）本文提出的自适应混合业务分组调度算法针对网络层性能，并没有考虑传输层、应用层的信息。同时针对网络层、传输层、应用层这三层信息进行跨层调度，进一步提高用户 QoS，是下一步需要研究的内容。

（2）异构无线融合网络广泛应用于通信发展中，从时频空三维角度研究混合业务分组调度是一个重点，也是一个难点，我们需要投入更多的精力。

参考文献

- [1] 罗强, 张平. B3G 网络联合无线资源管理的研究[J]. 电信科学, 2006, 22(6): 43-47.
- [2] http://portal.etsi.org/portal_common/home.asp?tbkey1=BRAN.
- [3] Koudouridis G P, Agüero R, Alexandri E, et al. Feasibility studies and architecture for multi-radio access in ambient networks[C]//Proceedings of the 15th Wireless World Research Forum Meeting. 2005: 8-9.
- [4] Pollard A, von Hafen J, Döttling M, et al. WINNER-Towards Ubiquitous Wireless Access[C]//VTC Spring. 2006: 42-46.
- [5] Buburuzan T, May G, Melia T, et al. Integration of broadcast technologies with heterogeneous networks—an IEEE 802.21 centric approach[J]. Consumer Electronics, ICCE 2007, 2007.
- [6] Buddhikot M M, Chandranmenon G, Han S, et al. Design and implementation of a WLAN/CDMA2000 interworking architecture[J]. Communications Magazine, IEEE, 2003, 41(11): 90-100.
- [7] Yu F, Krishnamurthy V. Optimal joint session admission control in integrated WLAN and CDMA cellular networks with vertical handoff[J]. Mobile Computing, IEEE Transactions on, 2007, 6(1): 126-139.
- [8] Hasib A, Fapojuwo A. Joint radio resource management over very tightly couple heterogeneous networks for multimode reconfigurable terminals[C]//Vehicular Technology Conference, 2006.VTC 2006-Spring. IEEE 63rd. IEEE, 2006, 2: 727-731.
- [9] Del Monego H I, Oliveira J M S, Ricardo M. Performance Analysis of Joint Radio Resource Management Strategies for Beyond 3G Networks[C]//Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, 2009. NGMAST'09. Third International Conference on. IEEE, 2009: 317-322.
- [10] Pan M, Chen J, Liu R, et al. Dynamic Spectrum Access and Joint Radio Resource Management Combining for Resource Allocation in Cooperative Networks[C]//Wireless Communications and Networking Conference, 2007. WCNC 2007. IEEE. IEEE, 2007: 2746-2751.
- [11] Stevens-Navarro E, Lin Y, Wong V W S. An MDP-based vertical handoff decision algorithm for heterogeneous wireless networks[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2008, 57(2): 1243-1254.
- [12] Song Q, Jamalipour A. Network selection in an integrated wireless LAN and

- UMTS environment using mathematical modeling and computing techniques[J]. Wireless Communications, IEEE, 2005, 12(3): 42-48.
- [13] Zhang Z, Li V O K. Network-supported layered multicast transport control for streaming media[J]. Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on, 2007, 18(9): 1332-1344.
- [14] Park S, Yoon H, Kim J W. A cross-layered network-adaptive HD video streaming in digital A/V home network: channel monitoring and video rate adaptation[J]. Consumer Electronics, IEEE Transactions on, 2006, 52(4): 1245-1252.
- [15] Son H, Lee S, Kim S C, et al. Soft load balancing over heterogeneous wireless networks[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2008, 57(4): 2632-2638.
- [16] Ning G, Zhu G, Peng L, et al. Load balancing based on traffic selection in heterogeneous overlapping cellular networks[C]//Internet, 2005. The First IEEE and IFIP International Conference in Central Asia on. IEEE, 2005: 5 pp.
- [17] Xiao X, Shi Y, Gao Y, et al. Layerp2p: A new data scheduling approach for layered streaming in heterogeneous networks[C]//INFOCOM 2009, IEEE. IEEE, 2009: 603-611.
- [18] Luo J, Mukerjee R, Dillinger M, et al. Investigation of radio resource scheduling in WLANs coupled with 3G cellular network[J]. Communications Magazine, IEEE, 2003, 41(6): 108-115.
- [19] Lee S K, Sriram K, Kim K, et al. Vertical handoff decision algorithms for providing optimized performance in heterogeneous wireless networks[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2009, 58(2): 865-881.
- [20] Shen W, Zeng Q A. Cost-function-based network selection strategy in integrated wireless and mobile networks[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 2008, 57(6): 3778-3788.
- [21] Wang H J, Katz R H, Giese J. Policy-enabled handoffs across heterogeneous wireless networks[C]//Mobile Computing Systems and Applications, 1999. Proceedings. WMCSA'99. Second IEEE Workshop on. IEEE, 1999: 51-60.
- [22] Sheng-mei L, Su P, Ming-hai X. An improved TOPSIS vertical handoff algorithm for heterogeneous wireless networks[C]//Communication Technology (ICCT), 2010 12th IEEE International Conference on. IEEE, 2010: 750-754.
- [23] Tzeng G H, Huang J J. Multiple attribute decision making: methods and applications[M]. CRC Press, 2011.
- [24] Maaloul S, Afif M, Tabbane S. A new vertical handover decision based context awareness for ubiquitous access[C]//Communications and Information Technology

- (ICCIT), 2012 International Conference on. IEEE, 2012: 231-236.
- [25] Yang K, Gondal I, Qiu B. Context aware vertical soft handoff algorithm for heterogeneous wireless networks[C]//Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th. IEEE, 2008: 1-5.
- [26] Zhang W. Handover decision using fuzzy MADM in heterogeneous networks[C]//Wireless Communications and Networking Conference, 2004. WCNC. 2004 IEEE. IEEE, 2004, 2: 653-658.
- [27] Stoyanova M, Mahonen P. Algorithmic approaches for vertical handoff in heterogeneous wireless environment[C]//Wireless Communications and Networking Conference, 2007. WCNC 2007. IEEE. IEEE, 2007: 3780-3785.
- [28] Lee H Y, Kang M, Sang Y J, et al. The modified proportional fair scheduling algorithms for real-time applications in multiuser multicarrier systems[C]//Military Communications Conference, 2009. MILCOM 2009. IEEE. IEEE, 2009: 1-6.
- [29] Kumaran K, Ramanan K, Stolyar A, et al. CDMA data QoS scheduling on the forward link with variable channel conditions[M]. Bell Laboratories, Lucent Technologies, 2000.
- [30] Shakkottai S, Stolyar A L. Scheduling for multiple flows sharing a time-varying channel: The exponential rule[J]. Translations of the American Mathematical Society-Series 2, 2002, 207: 185-202.
- [31] Xian Y J, Tian F C, Xu C B, et al. Analysis of M-LWDF fairness and an enhanced M-LWDF packet scheduling mechanism[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2011, 18(4): 82-88.
- [32] Gribova K, Jantti R. On scheduling video streaming data in the HDR system[C]//Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004 IEEE 60th. IEEE, 2004, 4: 2572-2576.
- [33] Khattab A K F, Elsayed K M F. Opportunistic scheduling of delay sensitive traffic in ofdma-based wireless[C]//proceedings of the 2006 International Symposium on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. IEEE Computer Society, 2006: 279-288.
- [34] Gutierrez P J A. Packet scheduling and quality of service in HSDPA[M]. Videnbasen for Aalborg Universitet VBN, Aalborg Universitet Aalborg University, Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet The Faculty of Engineering and Science, Afdeling for Kommunikationsteknologi Department of Communication Technology, 2003.
- [35] Song P, Cai L. Multi-user subcarrier allocation with minimum rate requests for

- downlink OFDM packet transmission[C]//Vehicular Technology Conference, 2004. VTC 2004-Spring. 2004 IEEE 59th. IEEE, 2004, 4: 1920-1924.
- [36] Ghaffar Pour Rahbar A, Yang O. LGRR: A new packet scheduling algorithm for differentiated services packet-switched networks[J]. computer communications, 2009, 32(2): 357-367.
- [37] Kumar A B, Hackett D F, Eisenhauer J, et al. Fuel Resource Scheduling, Part I-Overview of an Energy Management Problem[J]. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, 1984 (7): 1542-1548.
- [38] Guan-ding Y, Zhao-yang Z, Pei-liang Q, et al. Fair resource scheduling algorithm for wireless OFDM systems[C]//Communications, Circuits and Systems, 2005. Proceedings. 2005 International Conference on. IEEE, 2005, 1: 374-377.
- [39] Qiu J, Huang T. Packet scheduling scheme in the next generation high-speed wireless packet networks[C]//Wireless And Mobile Computing, Networking And Communications, 2005.(WiMob'2005), IEEE International Conference on. IEEE, 2005, 2: 224-227.
- [40] Elwalid A, Mitro D. Design of generalized processor sharing schedulers which statistically multiplex heterogeneous QoS classes[C]//INFOCOM'99. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE. IEEE, 1999, 3: 1220-1230.
- [41] Choi J G, Bahk S. Cell throughput analysis of the proportional fair scheduling policy[M]//NETWORKING 2004. Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; Mobile and Wireless Communications. Springer Berlin Heidelberg, 2004: 247-258.
- [42] 贺昕,李斌. 异构无线网络切换技术[M]. 北京邮电大学出版社, 2008.
- [43] 李军.异构无线网络融合理论与技术实现[M].北京: 电子工业出版社, 2009
- [44] 王彬. 无线局域网中的负载均衡技术[J]. 中兴通讯技术, 2006, 12(3): 46-50.
- [45] 周莲英, 陈凯. 异构网络垂直切换机制研究[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(9): 127-130.
- [46] Chen W T, Liu J C, Huang H K. An adaptive scheme for vertical handoff in wireless overlay networks[C]//Parallel and Distributed Systems, 2004. ICPADS 2004. Proceedings. Tenth International Conference on. IEEE, 2004: 541-548.
- [47] 黄家玮. 有线/无线网络中 TCP 拥塞控制的公平性研究[D].中南大学, 2008.
- [48] Gu érin R, Peris V. Quality-of-service in packet networks: basic mechanisms and directions[J]. Computer Networks, 1999, 31(3): 169-189.
- [49] Park T, Shin O S, Lee K B. Proportional fair scheduling for wireless

- communication with multiple transmit and receive antennas[C]//Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th. IEEE, 2003, 3: 1573-1577.
- [50] 刘德全, 何晨. 一种支持实时与非实时多业务的复合优先切换策略[J]. 上海交通大学学报, 2005, 38(11): 1841-1846.
- [51] 李志华, 赵宇. 无线网络分组调度算法研究[J]. 微处理机, 2008, 28(6): 81-82.
- [52] Qing He, Guang Chen, Le Zhang. A vertical handoff decision algorithm based on fuzzy control in WIMAX and TD-SCDMA heterogeneous wireless networks[C]//The 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing, Sep., 2010, pp.1-4
- [53] 李浪波. 异构无线网络中的 QoS 保障机制研究[D]. 北京邮电大学, 2012.
- [54] Lapsley D, Low S. Random early marking for Internet congestion control[C]//Global Telecommunications Conference, 1999. GLOBECOM'99. IEEE, 1999, 3: 1747-1752.
- [55] 尹翔. 异构网络环境下拥塞控制方法研究[D]. 浙江大学, 2013.
- [56] 钟红波, 陈志刚, 漆华妹. 基于无线网络的混合业务资源调度算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(7): 102-104.
- [57] 徐雷鸣, 庞博, 赵耀. NS与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社. 2003: 1~10.
- [58] NS2.TheNetworkSimulator-ns2.<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [59] 张鲁宁. 异构无线网络 NS2 仿真技术与实现[D]. 南京邮电大学, 2012.

攻读硕士学位期间主要研究成果和参与的项目

一、发表论文

- [1] 第二作者（通讯作者），A Self-adaptive Packet Scheduling Algorithm for Hybrid-traffic in Heterogeneous wireless Networks[J], **International Journal of Future Generation Communication and Networking**, Vol. 7, No. 6 (2014), pp. 69-80（已发表，国外英文 EI 核心期刊）
- [2] 第四作者，异构无线网络接入控制演示平台的实现[J], **东华大学学报**,（已录用，中文核心期刊）

二、发表专利

- [1] 第四发明人，一种直饮水设备联网系统[P], 中国发明专利，2014,10（已受理，受理号：201410172864.1）

三、参与项目

- [1] 异构无线环境中的联合接纳控制技术（13D110423），2013-2014，中央高校基本科研业务专项资金

致 谢

春华秋实，寒暑三易，转眼间，研究生两年半的学习生涯随着论文的完成即将结束，从此我将走出校园并走上工作岗位。在这两年半的学习生活中，我不仅收获了专业知识，也认识了很多让我受益一生的老师、同学和朋友。在此谨向予以我关怀的人们表达最诚挚的感谢与祝福。

首先，我要感谢我的导师陈雯副教授。起初的我对专业技术懵懂无知，是陈老师指引我迈向专业技术领域，包括知识理论与技术实践。从论文选题、方案设计、小论文发表到大论文的撰写，都给予我极大的关怀和耐心的引导。我很荣幸成为陈老师的学生，正是陈老师的谆谆教诲和悉心栽培，我才能顺利的完成研究生学业。陈老师务实忘我的工作作风、严谨的治学风格、丰富的实践经验、渊博的专业知识、给我留下了深刻的印象，使我终身受益。陈老师国际化的视野，前沿而精髓的学术造诣，让我永志不忘，深刻影响着我日后的工作和生活。

感谢东华大学为我提供平台，感谢东华大学信息学院的全体老师。两年半的时间里，信息学院的老师用严谨的教学的态度，丰富的知识潜移默化的影响着我。感谢实验室的兄弟姐妹们，丰文斌、周水清、龚世林，还有张晓露博士等人，大家相互学习，一起探讨。同时也感谢侯伟毅，张远，金康，郁晓慧，孔德凤等人，大家一起探讨学术及攻略笔试面试等问题。感谢我的室友袁冬冬和郭吉政在学习生活中给予我的支持与帮助。当我遇到挫折气馁时，他们的鼓励与肯定总能使我重新燃起斗志。和他们并肩学习生活的日子将成为我人生中最美好的回忆，大家间的友谊是我人生一笔最宝贵的财富，感谢他们的陪伴与支持。

我特别感谢我的家人，感谢父母二十多年来的养育之恩，是他们在背后给我默默的支持，使我有强大的动力，感谢他们为我做的一切！在我求学路上，他们总是默默奉献，从精神和经济上无私的支持我的学业和生活，他们给我最无私伟大的爱，给我积极进取的精神和坚忍不拔的毅力。

最后由衷的感谢各位专家在百忙之中抽出宝贵的时间对我的论文进行审阅，谢谢你们！