

摘 要

无线 IP 网络是无线网络的发展趋势,它必须能支持不同业务的服务质量(QoS quality of service)要求。现有的 QoS 技术大都是针对有线 IP 网络的,要将他们应用到无线 IP 网络上必须要进行相应的改进。本文正是在这种情况下对无线 IP 网络的 QoS 技术展开了研究。

从整体上,本文依次研究了无线 IP 网络各种 QoS 技术,包括服务模型等,然后提出了一个无线 IP 网络层次型 QoS 模型。该模型将多层次、多平面 QoS 技术结合起来,能够严格保证每条业务流的 QoS 要求。

从细节上,本文研究了无线接入网 IEEE802.16 协议中的 QoS 技术。通过对其 MAC 层 QoS 策略的研究,进一步提出了一个有效的 IEEE802.16MAC 层 QoS 调度架构,并对其中采用的 WF²Q 调度算法做了仔细研究。最后用 OPNET 软件对该调度架构进行建模和仿真,验证了该调度架构的正确性。

关键词: 无线 IP 网络 QoS IEEE802.16 调度 WF²Q

ABSTRACT

Wireless IP network is the developing direction of wireless network. It must support the QoS (quality of service) demand of various services. Currently, most of the QoS technologies are face to wire IP network, so they must be improved before they are used into wireless IP network. Just in this status, this paper does some research about QoS technologies of wireless IP network.

Wholly, this paper do some research about various QoS technologies of wireless IP network, such as QoS service model etc. Then this paper proposes a hierarchy QoS model. This model combine QoS technologies of different layers and different planes, it can guarantee the QoS demand of every service strictly.

Specially, this paper does some research about IEEE802.16 protocol of wireless access network. After doing some research about QoS strategy of MAC layer, an efficient scheduling structure of IEEE802.16 MAC layer is proposed. This paper also does some research about the correlative WF²Q algorithm. Lastly, we build a simulation model of this structure using opnet software, and prove the model's validity through simulation.

Keywords: Wireless IP network QoS IEEE802.16 Scheduling WF²Q

创新性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的科研成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

本人签名： 张丹

日期： 2006.1.6

关于论文使用授权的说明

本人完全了解西安电子科技大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属西安电子科技大学。本人保证毕业后，发表论文或使用论文工作成果时署名单位仍然为西安电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。

本学位论文属于保密在_____年解密后适用本授权书。

本人签名： 张丹

日期： 2006.1.6

导师签名： 刘乃安

日期： 2006.1.6

第一章 绪论

1.1 引言

移动通信和 Internet 的飞速发展,带来了在任何时间、任何地点都可以享用 Internet 业务的需求。根据 UK ARC Group 预测,无线 Internet 业务的用户到 2004 年将达到 7.5 亿户,Internet 用户总数将达到 10 亿户。无线 Internet 的用户将占 Internet 用户的大部分^[1]。因此新一代无线通信和 Internet 的有机结合产生的无线 IP 网络是当前国际上的研究热点。IP 技术和无线通信技术的结合,是将来无线网络的趋势。无线 IP 网络一般是指无线终端接入 IP 网的网络,例如 WLAN+Internet 构成全 IP 网络,或是以别的空中接口+Internet 构成全 IP 网络。无线 IP 网络是对有线 IP 网络的有益补充,它具有用户可移动、建网灵活、维护费用低等优点。无线 IP 网络的提出,是 IP 网络发展的一个重大标志,同时也是无线网络发展过程中的一个里程碑。

随着 Internet 的迅速发展,Internet 已由单一的数据传输网向多业务承载网演进,以前那种以 Email、文件传输等为主的单纯的数据传输业务已远远不能满足用户的需求,一些多媒体应用如视频点播(Video On Demand, VOD)、IP 电话、远程教学不断涌现。这些不同的应用需要有不同的服务质量(Quality of Service, QoS)要求。而目前的 Internet 没有明确的时间和可靠性保障,无法满足各种应用对网络传输质量的不同要求。这是因为,首先 IP 技术本身是面向无连接的技术,IP 网络提供的业务仅仅是“尽力而为”的业务,网络本身是不保证传输可靠性的。其次, TCP/IP 协议体系中的 TCP 或 UDP 协议虽然对于 Internet 的传统应用可以提供一定容错和纠错功能,但对于一些实时业务来说, TCP 的重传机制显得苍白无力。抛开 TCP 建链和确认的时延不说,重传引入的时延对于这些对时延极其敏感的实时业务来说是不能忍受的,而 UDP 本身就是不可靠的。因此, Internet 如何提供 QoS 支持来满足不同业务的 QoS 需求也已成为业界关注的焦点。

本文结合有线 IP 网络的 QoS 技术,研究了无线 IP 网络的 QoS 技术,将多层次、多平面的 QoS 技术相结合,建立了一个集成了多种技术的层次型无线 IP 网络 QoS 模型。并且提出了一种有效的宽带无线接入网 IEEE802.16 协议 MAC 层的 QoS 调度架构,并对其性能进行了仿真和分析。

1.2 无线 IP 网络 QoS 技术的研究现状

目前,随着电信业务的引入,IP 网的服务质量(IP QoS)成为下一代 Internet 的

重要研究课题。由于 IP 协议的无连接特性和 IP 网络松散的控制管理方式,使这项研究面临很大的挑战。IP QoS 的研究范围十分广泛,不仅包含业务流量控制和路由,还涉及到计费和网络测量等。当前基本的 IP QoS 技术有集成服务(IntServ)模型^[2]和区分服务(DiffServ)模型^[3]。集成服务的基本思想是在传送数据之前,根据业务的 QoS 需求进行网络资源预留,从而为该数据流提供端到端的 QoS 保证。资源预留协议(RSVP)是集成服务的核心^[4]。这是一种信令协议,用来通知网络节点预留资源。如果资源预留失败,RSVP 协议会向主机发回拒绝消息。集成服务能够在 IP 网上提供端到端的 QoS 保证。但是,集成服务对路由器的要求很高,当网络中的数据流数量很大时,路由器的存储和处理能力会遇到很大的压力。因此,集成服务的扩展性很差,难以在 Internet 核心网实施。区分服务的基本思想是将用户的数据流按照服务质量要求来划分等级,任何用户的数据流都可以自由进入网络,但是当网络出现拥塞时,级别高的数据流在排队和占用资源时比级别低的数据流有更高的优先权。区分服务只承诺相对的服务质量,而不对任何用户承诺具体的服务质量指标。除了这两种基本的 QoS 技术,具体的 QoS 实现技术还有路由器处的接纳控制、流量调节、流量控制、QoS 路由等等,均能有效地改善 IP 网络服务质量。

对于无线 IP 网络来说,它的拓扑和资源都在动态变化,要提供服务质量比有线 IP 网络更为困难。目前,根据无线和移动环境的特点,人们对原有的 QoS 技术做了改进,使之能适应无线环境。例如,目前的 RSVP 不适合于移动 IP 网络,主要原因是它无法感知主机的移动,因而不能在移动主机即将访问的位置上提供预留资源,当主机移动到新的子网后往往因缺乏资源而形成服务质量下降。另外,目前的 RSVP 不支持经过 IP 隧道的资源预留,因此不能适应移动 IP 网利用隧道传送数据时的服务质量要求。为了克服 RSVP 的缺陷,学者们提出了几种解决方案: MRSVP^[10],支持隧道的 RSVP^[11]等,这些改进后的方案均能适应无线环境。目前的 DiffServ 不能满足无线 IP 网络的要求,主要原因有两个:一是没有信令,不能做到实时控制。另一个原因是不能动态配置服务质量参数。因此,无线环境下的 DiffServ 对原有 DiffServ 的功能进行了扩展。主要是增加了信令协议,增加了对移动性的支持,使之适应无线环境^[16]。

目前 IP 网络在 QoS 上面有了很大的进步,但现有的 IP 网络大都只是在单个节点上提供相对优先级的处理。而端到端 QoS 是一个系统的整体概念,如果没有在全网层面上解决业务感知和接入允许控制,就不可能真正解决端到端的业务质量问题。因此,IP 网络需要从路由器/资源方面实施相应的 QoS 控制策略,要有一个全网的 QoS 解决方案。这种方案应该是一种基于资源隔离和业务请求的 IP QoS 模型及方法,将多层次(应用层、传输层、网络层、链路层、物理层),多平面(数据平面、控制平面和管理平面)QoS 机制综合起来,能够严格保证每条业务流穿越

IP 骨干网时的 QoS 要求,使得 IP 网络可以支持各类需要电信级服务质量的电信业务。本文正是基于这样一个基础,研究了无线 IP 网络的各种 QoS 技术,并将他们有效地结合起来。

无线接入网是整个无线 IP 网络的瓶颈,因此无线接入网的 QoS 问题显得尤为突出和重要。标准的 RSVP 协议由于其可扩展性差难以在核心网使用,但在接入网中却很适用。目前,业内比较一致的观点是在整个 IP 网络的网络边缘引入 QoS 信令技术,因此接入网中引入 QoS 信令来解决 QoS 是一种趋势。接入网所接入的业务是多种多样的,这种多样性使得 QoS 的问题更为复杂,其中 MAC 技术和资源调度控制是解决 QoS 的关键,必须有高效的上行接入控制协议和带宽动态分配算法。IEEE802.16 标准是目前一致看好的无线接入网标准,它能向固定、携带和游牧的设备提供无线连接,还可用来连接 802.11 热点与 Internet 网络。IEEE802.16 标准是按照两层结构体系组织,定义了一个物理层和一个 MAC 层^[29]。物理层主要是关于频率带宽、调制模式、纠错技术以及发射机同接收机之间的同步、数据传输率和时分复用等方面的,而 MAC 层主要负责控制用户数据接入到共享的无线媒质中去。MAC 层规定了资源调度的 QoS 业务类型,将业务分为 UGS, rtPS, nrtPS, BE 四类,但并没有规定具体的调度实现,这部分是留给厂家设计的。因此本文基于这点对 MAC 层资源调度方法进行了详细研究。

1.3 本文研究内容

无线 IP 网络 QoS 技术是 IP 网络技术的热点问题,系统化的层次型 QoS 模型能有效地改善网络的服务质量,满足各种业务对服务质量的要求。本文首先对无线 IP 网络的各种 QoS 技术进行一一研究,然后将各层、各面的 QoS 技术结合起来,形成了一个层次型的 QoS 模型。

对于无线接入网的 IEEE802.16 标准,本文着重研究并提出了一种有效的 MAC 层资源调度架构。无线环境下由于信道的特殊性,误码或其他原因会造成某一正在传递数据的连接暂时中断,此时分配给该连接的资源就会被浪费。因此,本文中 IEEE802.16 MAC 层的调度架构采用带宽再分配和补偿的方法,不仅能够满足各种业务的 QoS 要求,还能够对带宽充分使用。最后用 OPNET 软件对该调度架构进行性能仿真,验证了该架构的有效性。

第二章 无线 IP 网络 QoS 技术

2.1 无线 IP 网络和 QoS 的概念

无线 IP 网络一般是指无线终端接入 IP 网的网络, 例如 WLAN 接入 Internet, 或是以别的空中接口接入 Internet, 所以无线 IP 网络是一个集成无线蜂窝网络、无绳网络、无线局域网(WLAN)、短距离应用的蓝牙等系统和固定的有线网络为一体的结构, 各种类型的无线接入网都能无缝地接入基于 IP 的核心网。它可以同时提供包括语音、数据和视频在内的多媒体业务。无线 IP 网络概念模型如图 2.1 所示, 主要包括 IP 核心网、移动站(MS)和基站(BS), 基站充当小区内各 MS 与有线 Internet 网络间的网关, 使得各个 MS 可以无缝地接入核心网。

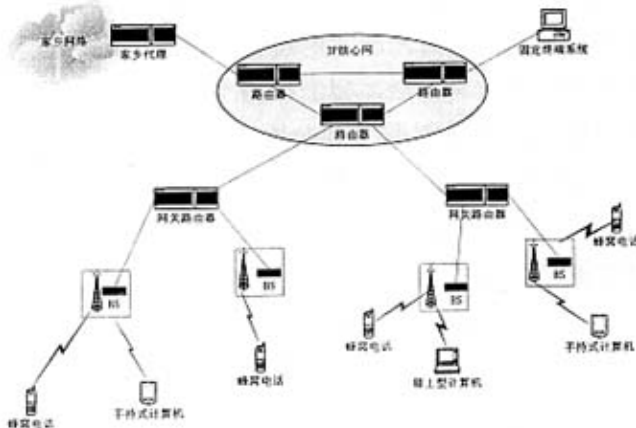


图 2.1 无线 IP 网络

当移动主机处在它的家乡网络(home network)时, 完全由它的 IP 地址来标识, 这一地址称为家乡地址(home address)。当移动主机移动到外地网络时, 外地代理提供移动主机一个转交地址, 并将转交地址通知给家乡代理进行登记(外地代理是外地网络中的一台路由器, 家乡代理是家乡网络中的一台路由器)。任何通信对端如果要与移动主机通信, 它只需发送目的地址是移动主机的家乡地址的 IP 包即可。而家乡代理负责截取这些 IP 包, 封装成目的地址是移动主机的转交地址的新 IP 包, 然后发往外地代理, 外地代理取出原始封包, 并将原始 IP 包转交给移动节点, 这一过程称为隧道过程。一个数据包被封装在另外一个数据包的净荷中进行传送时所经过的路径称为隧道。从移动主机发往通信对端的 IP 包无需经过隧道过程, 可直接发送^[9]。

随着 Internet 的迅速发展, Internet 已由单一的数据传输网向多业务承载网演进, 以前那种以 Email、文件传输等为主的单纯的数据传输业务已远远不能满足用户的需求, 一些多媒体应用如视频点播(Video On Demand, VOD)、IP 电话、远程

教学不断涌现。这些不同的应用需要有不同的服务质量(Quality of Service, QoS)要求。那么, QoS 到底指的是什么呢? ITU2T 标准化组织在 E.800 中是这样描述 QoS 的: QoS 是一种服务性能的综合体现, 这种服务性能决定了网络在多大程度上满足业务用户的要求。从根本意义上说, QoS 指网络对业务性能要求的支持能力。这里的性能要求是特定于不同业务的, 即不同的业务有不同的性能要求。对于通信网中的 QoS, 上述性能要求可以用性能参数来描述, 例如: 业务可靠性、时延、抖动、吞吐量和数据丢失率等。实际上, 通信 QoS 所涉及的主要评估标准并不仅仅局限于上述五种性能参数, 为了全面而准确地描述通信服务的 QoS,人们构造了通用的 QoS 概念模型。

通常对 QoS 定义的理解可以分为三个方面: 服务固有的 QoS、用户感知的 QoS 和用户评价的 QoS。这三个方面自上而下构成了通用 QoS 概念模型^[6], 如图 2.2 所示。此模型也是 ITU(国际电信联盟)和 ETSI(欧洲电信标准协会)以及 IETF(互联网工程任务组)组织定义 QoS 时所采用的方法。

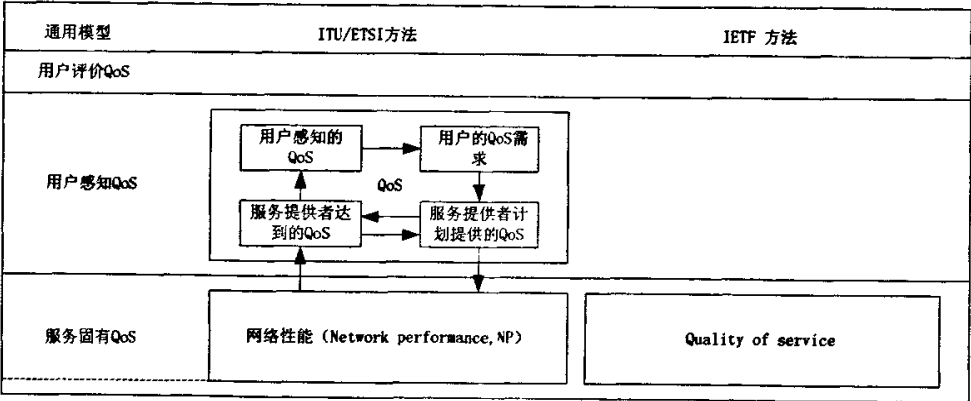


图 2.2 通用 QoS 概念模型

服务固有 QoS 属于和服务特性相关联的技术方面的范畴, 因而, 服务固有 QoS 是由传输网络设计的优劣, 以及网络接入、中止和连接的提供情况所决定的。除了其他一些必要的工作外, 通过适当地选择传送协议、QoS 保证机制和相关参数的数值, 就能够得到特定应用所要求的 QoS。对服务固有 QoS 的评价需要通过可对测量的、用户所期望的性能特性进行比较来实现, 用户对 QoS 的主观感知评价不会影响服务固有 QoS 的等级。

用户感知的 QoS 反映了用户对使用特定服务的体验。它受观察到的服务性能和用户期望相比较后的比较结果的影响。因而, 对于不同的用户, 具有相同固有 QoS 特性的服务会得到不同的评价。实际上, 仅仅确保特定的服务性能参数还不足以保证能够满足用户的 QoS 要求, 服务提供者提供的 QoS 必须在反映固有 QoS

特性的同时,还反映一些对用户有意义的以及和特定用户群体期望相关联的非技术参数。

只有当用户决定是否继续使用电信服务时,服务提供者才能知道相应服务的“用户评价 QoS”,这一决定取决于被感知 QoS、服务价格、以及服务提供者受理用户抱怨和服务问题的响应情况。在这里,为客户提供服务时的态度是影响用户评价 QoS 等级水平的一个重要因素。

QoS 定义所包含的这三个方面的用户满意程度可以分别考虑。首先,它是网络提供者的职责,并依赖于网络体系结构、规划和管理。它是工程师、设计人员和网络运营商处理的一个重要的技术问题。其次,针对提供的特定服务进行调整后的固有 QoS 性能的合理使用,同时结合适当的市场分析,对于确保高水平的被感知 QoS 是非常必要的,这是服务提供者的责任。广告和市场效果也会影响被感知 QoS。最后,被评价 QoS 主要依靠服务提供者的收费策略,以及可信赖的用户服务人员和技术支持水平。

ITU/ETSI 提出的定义方法中的 QoS 没有涉及到用户评价 QoS,并且较为关注用户感知的 QoS。另外,在技术层面上还提出了网络性能(Network performance, NP)的概念,它是对应于服务固有 QoS 的。ITU 和 ETSI 还提出了四种不同的 QoS 视角:用户的 QoS 需求;服务提供者计划提供的 QoS;服务提供者达到的 QoS;用户感知的 QoS。这四个视角描述形式相结合能够非常准确而全面地对 QoS 进行描述,是进一步有效实现 QoS 管理的基础。在使用网络服务时,每次用户投入的流量,用户的 QoS 需求,与服务提供者计划提供的 QoS 服务相对照,服务提供者与用户必须制定一个两者都同意的 QoS 服务等级,他们商量好的内容就叫做 QoS 服务等级协议(SLA: Service Level Agreement)。SLA 规定了服务提供者必须提供的服务以及服务提供者没有达到目标时所受到的惩罚^[7]。

IETF 定义方法中的 QoS 关注于服务固有 QoS,并不涉及到用户感知 QoS,它关心的是网络的结构、容量、可靠性和有效性,这与 ITU/ETSI 定义的 NP 很接近。IETF 提出了两种重要的 QoS 服务模型: IntServ 和 DiffServ,还标准化了资源预留协议(RSVP),在下节我们将研究这两种重要的 QoS 服务模型。

2.2 QoS 服务模型

2.2.1 IntServ 模型

对于有线 IP 网络, IETF 在早期提出了 IntServ 模型。IntServ 模型又称为集成服务模型,其基本思想是在传送数据之前,根据业务的 QoS 需求进行网络资源预

留,从而为该数据流提供端到端的 QoS 保证。为此,集成服务通常采用面向流的资源预留协议(RSVP),在流传输路径上的每个节点为流预约并维护资源。IntServ 模型除了传统的尽力而为服务业务外,还提供了保证型业务(Guaranteed Service)和控制负载型业务(Controlled-load Service)。他们分别适用于实时性业务和要求可靠传输的业务。

在 IntServ 模型中,以资源预留协议(RSVP)作为其主要指令,用来在网络各级路由器上预留网络资源,提供 QoS 服务。IntServ 的工作过程为:发送端在发送数据流之前,利用 RSVP 发送一个路径消息(Path message),路径消息中包含发送端到接收端的路由信息以及对业务流的描述,如平均速率、峰值速率、包长和最大时延等,但 RSVP 协议并不解释这些参数。当数据通路上的某台路由器收到这个 PATH 消息时,它就把该数据流的状态信息保留下来。当接收端收到该 PATH 消息时,它产生一个 RESV 消息表示 QoS 请求并把它返回给发送端。RESV 消息将在与 PATH 消息相同的路径上反方向转发,沿途路由器根据请求保留资源。因为每台路由器在数据流转发的过程中都保存了状态信息,由 RSVP 控制信息周期性地刷新,因此需要在端到端的通信中周期性地交换 PATH 和 RESV 消息。在无刷新信息的情况下,状态信息会因超时而删除^[6]。

这种模型的优点是能提供端到端的绝对的 QoS 保证,但这种模型在实现上是非常困难的,主要体现在:第一,由于预留是基于每个流而进行的,因此使得节点要保留每个流的状态信息,导致核心路由器负担太重,因此可扩展性很差。第二,网络中每个节点都要维护各类数据库,并实现复杂的功能模块(如资源预留、路由、接纳控制等),造成了极大的复杂性。

2.2.2 DiffServ 模型

由于 IntServ 模型的局限性,IETF 又提出了 DiffServ 模型,又称为区分服务模型。与 IntServ 相比,DiffServ 定义的是一个相对简单而粒度粗一些模型,针对的是流聚合后的每一类 QoS 控制,而不象 IntServ 那样针对每个流。它实质是给业务分级,在用户和业务网的接口处,即在网络的边界对业务分类,对每个数据包的不同标识进行分级。在边界上尽可能地对业务进行调整,若是同一级别的业务,则在该网络域中被聚合在一起统一传送,这种分类操作是基于包头的内容对业务数据包进行的。

DiffServ 具体操作是,将 IP 包头中的 IPv4 的 TOS 域或 IPv6 的流类型域重新定义为 DS 标识域(DSCP),用于标识业务的质量需求类型。网络节点读取数据包的 DSCP 值,根据已建立的 DSCP 与每一跳转发方式(PHB)之间的映射关系,选择相应的 PHB 对数据包进行处理,这种处理主要指以保证不同业务需求质量的策略

体系（队列策略、丢包策略等）为基础的资源（带宽和缓冲区）分配。值得注意的是，PHB 并不是路由选择的条件。DiffServ 体系中路由器有边界路由器和核心路由器之分。在网络内部的核心路由器中只保存简单的 DSCP 与 PHB（每跳行为）的对应机制，根据数据包头部中的 DSCP 值对数据包进行相应的优先级转发，而业务流状态信息的保存与流量机制的实现等都在网络边界节点进行，内部节点是与状态无关的。

DiffServ 工作组已经定义了下面的 DSCP 与 PHB 的映射关系，但同时也允许服务提供者自行定义具有本地意义的映射关系。加速转发(EF)：EF PHB(或 EF)的流量不受其他 PHB 流量的影响，确保包的离开速率高于所规定的值。能提供低丢包率、低延迟、低抖动和有保证的带宽服务。保证转发(AF)：AF 为 IP 包提供不同级别的转发特征。支持 AF PHB 的路由器必须支持 4 个分别独立的类。路由器为 4 类 AF 中的每类都分配特定数量的转发资源（比如缓冲区和带宽）。4 个类中分别设有等级 1、等级 2、等级 3 的三个等级。如果网络拥塞时，就按照优先级低的顺序丢弃，优先级高的数据包尽可能直接转发^[9]。

与 Intserv 相比，Diffserv 有很大的优越性。第一，在网络节点不需要维护每个流的信令或状态。第二，可以将许多单个流汇聚映射成一些较少的特殊业务流，使得其可扩展性和升级性明显优于 IntServ。第三，DiffServ 中每个单独的主机或应用程序都可不需要修改就能接收具有优先级的服务，对进入网络的分组进行分类、标记及可能的调整都是由外界路由器完成的，与此类似，核心和路由部件也只需很少的改动或几乎不需改动。目前在 IP 网中区分服务得到了绝大部分厂家的支持，其具体实现技术包括分类、标记、流量整形、拥塞避免、队列调度等。但区分服务也有自己的局限性，主要体现在：区分服务只承诺相对的服务质量，不能提供端到端的 QoS，因而不能对用户提供服务质量的绝对保证。

对于无线 IP 网络来说，它的拓扑结构和资源都在动态变化，要提供服务质量保证比固定网络更为困难。目前，根据无线和移动环境的特点，人们对原有的 QoS 服务模型作了改进，下面我们来进行简单的研究。

2.2.3 无线移动环境下的 IntServ 和 RSVP

目前的 RSVP 不适合于移动 IP 网络，主要原因是它无法感知主机的移动，因而不能在移动主机即将访问的位置上提前预留资源，当主机移动到新的子网后往往因缺乏资源而形成服务质量下降。另外，目前的 RSVP 不支持经过 IP 隧道的资源预留，因此不能适应无线 IP 网利用隧道传送数据时的服务质量要求。为了克服 RSVP 的缺陷，学者们提出了以下几种解决方案。

1) MRSVP^[10]

MRSVP 是一种扩展 RSVP 支持移动性的方案。在 MRSVP 中, 协议预测移动主机下几跳可能到达的位置。并在这些位置提前预留资源, 从而保证移动主机的 QoS, 但协议本身并没有提出具体的路径预测算法。提前预留资源的工作由每个子网中的移动代理代替主机来完成。

在 MRSVP 中有两种资源预留类型, 即主动资源预留和被动资源预留。主动资源预留用于移动主机当前的实际会话路径; 被动资源预留用于移动主机的预测会话路径。被动资源预留可以被其他业务流使用。当预测会话路径由于移动主机的切换变成实际会话路径时, 该路径上的被动资源预留即转变为主动资源预留, 如果当时有其他业务流正在使用被动预留资源, 那么该业务流需要立刻释放所占资源。由于 MRSVP 在移动主机可能到达的位置提前预留资源, 使得移动主机可在新位置获得所需资源的概率增加, 从而以更大的概率保证了移动主机的服务质量。

2) 支持隧道的 RSVP^[11]

RSVP 隧道描述了一个 IP 隧道的增强机制, 它提供了把 RSVP 消息传输于 IP 隧道的信令, 使得 RSVP 可以通过 IP 隧道预留资源, 解决了 RSVP 信令的不可见问题。首先, 发送节点发送一个端到端 PATH 消息。隧道入口点封装此端到端 PATH 消息并把消息发送到隧道出口点进行解封装, 然后继续传送。当一个相应的端到端 RESV 消息到达隧道出口点时, 隧道出口点封装 RESV 消息, 并发送到隧道入口点。根据端到端 PATH 消息中的信息和端到端 RESV 消息中的流说明, 隧道入口点把端到端会话映射到一个隧道会话, 发送一个对应于上述端到端会话的隧道 PATH 消息, 建立一个新的隧道。隧道出口点发送一个隧道 RESV 消息来响应隧道 PATH 消息, 并在隧道内预留资源。

3) HMRSVP^[12]

HMRSVP 是一种分层 Mobile IP (移动 IP) 和 MRSVP 相结合的分层 MRSVP 方案, 该方法充分利用了分层 Mobile IP 的特点, 通过 MRSVP 和移动 IP 区域注册来实现服务。目前有三种 HRSVP 方案, 分别称之为 HMRSVP_m^[13], HMRSVP_u^[14] 和 HMRSVP_{ff}^[15]。

2.2.4 无线移动环境下的 DiffServ

DiffServ 是针对静态环境即固定主机和固定网络而设计的, 由于无线资源的有限和 QoS 请求的高度动态性, 因而并不完全适应于移动环境。主要原因有两个: 一是没有信令, 不能做到实时控制。另一个原因是不能动态配置服务质量参数。因此, 考虑到无线链路的特征, 要对 DiffServ 进行以下的强化^[16]:

1) 有效的信令机制

在无线网络里一种简单而有效的信令体系是很必要的, 因为: 首先, 当用户

在进行移动和功率控制时, 基站与移动用户之间需要有很多的参数交互。为此, 引入了一种改进的 ICMP 协议来实现基站和用户之间的参数交互。

2) 动态的自适应无线资源分配

无线链路的资源是少量而珍贵的, QoS 控制要在多种类型业务之间实现无线资源的共享, 可以采用一种基于优先级别的队列调度算法(CBQ)来进行数据包的调度, 并根据当前的有效带宽情况和数据流特性动态调整数据流的级别。

3) 移动性管理

当有移动用户切换进入一个新的基站服务区域时, 该基站必须满足此用户的带宽分配请求, 因为服务质量如果由于切换而突然下降对于用户来说是难以容忍的。为此, 可以设计一种新的服务级别 new-mobile 来表示刚切换来的用户, 在调度器中, 该级别处于优先的位置。每个新切换来的移动用户都可以在一定时间内享用此优先级别, 经过一段时间后再重新根据该用户的业务流量特性重新审定其级别。另外一种解决方案是为这类用户预留一定的带宽, 在没有切换用户时, 这份带宽可以被本区域内的其他用户使用。当有一个用户移出小区时, 空出的带宽会在剩下的用户中重新分配。

2.2.5 无线 IntServ 和无线 DiffServ 结合

从上述分析可以看出, IntServ 和 DiffServ 这两种服务模型各有自己的长处和局限, 都不能完全满足需要。但两者具有结合的可行性, IntServ 提供了一种在异构网络元素之上提供端到端 QoS 的方法, 所以可以将 DiffServ 网络视为更大的 IntServ 网络中的一种网络元素。在网络边缘放置 IntServ/RSVP 区域, 在核心放置 DiffServ 区域^[17], 主干网中的 DiffServ 看成 IntServ 的一跳, 如图 2.3 所示。另一方面, 为了支持这样的集成框架, DiffServ 区域必须满足以下需求: (1)端到端的 RSVP 信令至少应该被透明地传过 DiffServ 区域。(2)必须能够在 DiffServ 区域的边界路由器之间为标准的 IntServ QoS 服务提供支持, 在 DiffServ 区域内部用 PHB 来调用这些服务。(3)必须在 DiffServ 区域的边界节点执行适当的控制, 管理。(4)DiffServ 区域必须为其他网络提供接纳控制以便于资源的利用。

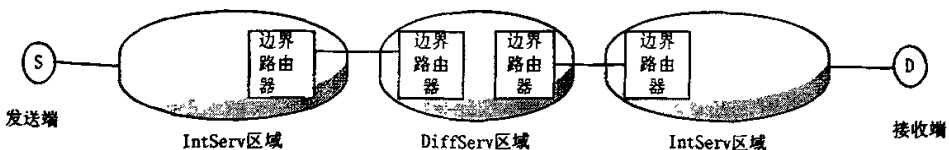


图 2.3 IntServ 和 DiffServ 结合

根据以上研究我们可以看出, 无线环境下的 QoS 策略的发展趋势是在核心网

采用 DiffServ, 在无线接入网采用 IntServ, 无线接入网内用信令协议支持动态资源分配; 资源分配信令可以和移动主机位置管理信令相结合, 以加快资源分配过程, 减少信令开销。

2.3 QoS 网络的结构

2.3.1 QoS 网络结构

从 QoS 的角度看, 网络是由主机、路由器、链路、策略服务器(policy server)、带宽管理器(网络服务器的一种)构成的^[18]。网络结构如图 2.4 所示。下面简单介绍这些构成网络的元素。

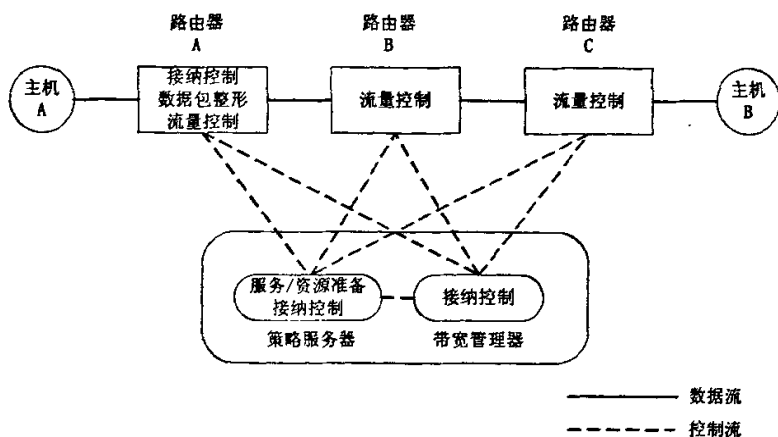


图 2.4 QoS 网络结构

1) 主机

主机上的应用是收发流的主体。应用在发送之前先向网络提出流的 QoS 要求。

2) 链路

链路是把数据传送至远方的媒介。包括专用线, 还有 LAN、ATM 网络、无线网等, 使用这些链路来实现 QoS 时, 有一些特殊要求需要考虑。

3) 边界/核心路由器

每个 QoS 区域的入口及出口的路由器称作边界路由器, 除此之外的路由器称作核心路由器。一般来说, 路由器就是执行流量控制。即执行送出数据包顺序的控制, 或者选择丢弃数据包, 给每个流分别赋予被指定的 QoS。而一般边界路由器还设有接纳控制和流量调节机构。接纳控制用于当申请 QoS 服务时, 判断该申请是否可以被接受。流量调节机构用于确认流入及流出 QoS 区域的流是否满足事先指定好的条件(平均输入速率、最大速率、最大脉冲长度、最大数据包长度等)。

如果符合条件,就进入下一个流量控制阶段。如果不符合,就将数据包整形至符合条件。

4) 策略服务器

代办路由器的接纳控制、资源准备的部分。例如,向有 QoS 要求的用户回答其是否有提出要求的权利,以及提出的 QoS 要求是否可以被接受。并且将管理服务准备、资源准备的信息,传递给每个路由器。它还负责将网络管理员的网络运用策略传递给每个路由器,例如指定分配给尽力而为服务流的数据传输率的大小等。

5) 带宽管理器

带宽管理器总是掌握着全网络的资源使用情况。每个路由器应该具有向带宽管理器提供该路由器的资源量以及它的使用情况的信息的通信功能。

2.3.2 路由器工作原理

在构成 QoS 网络的元素中,路由器是较为重要的一个部件。下面我们来研究一下路由器的工作原理。路由器的功能,本来只具有普通路由的作用,但为了执行 QoS 功能,就在以前的路由器加上了三个功能:接纳控制机构、流量调节机构、流量控制机构。它的工作原理如图 2.5 所示,我们从数据平面和控制平面两个方面来研究。

数据平面

直接在用户数据包里加入 QoS 控制。它分为以下几个方面

1) 流量调节机构

设置在每个路由器的输入输出端口。输入数据包按照流分类,分别检查是否满足被指定的流的特性。如果满足,就让它通过。如果不满足,就按照流量调节的框架处理。作为处理的例子有丢弃、延迟、标记等。

2) 转发(forwarding)

这个功能可以是普通路由器的操作。参照每个数据包的包头内的发送目的地和路由器内的路由选择表,选择路由器的输出端口,并向端口传送。但是现在的 Internet 路由协议都采用单个测度(如跳数、成本)来计算最短路由,没有考虑多个 QoS 参数的要求。因此我们可以考虑采用不同与以往路由策略的 QoS 路由来满足业务的 QoS 要求^[9]。QoS 路由根据多种不同的度量参数(如带宽、成本、每一跳开销、时延、可靠性等)来选择路由。它包括三个主要功能:链路状态信息发布,路由计算和路由表存储。QoS 路由的主要目标是为接入的业务选择满足其服务质量要求的传输路径,同时保证网络资源的有效利用。QoS 路由能够满足业务的 QoS 要求,同时提高网络的资源利用率。但是 QoS 路由的计算十分复杂,增加

了网络的开销，目前实用的 QoS 路由算法还不多见。

3) 流量控制机构

将从路由器内的多个输入端口向特定的输出端口传送的数据包按流或 DS 字节分类，使得每个流或流的集合都满足被指定的特性，执行流量控制。流量控制包括队列管理和调度。队列管理就是对队列长度的控制，调度就是对队列送出顺序的控制。调度算法有多种，其中包括 FIFO（先入先出），优先级调度，循环调度，WFQ 加权公平调度、自同步公平调度、WF²Q、虚拟时钟调度、基于分类调度等算法。

4) 数据包分类机构

流量调节机构和流量控制机构的内部设置有数据包分类机构，它将分类出作为流量调节机构和流量控制对象的数据包。

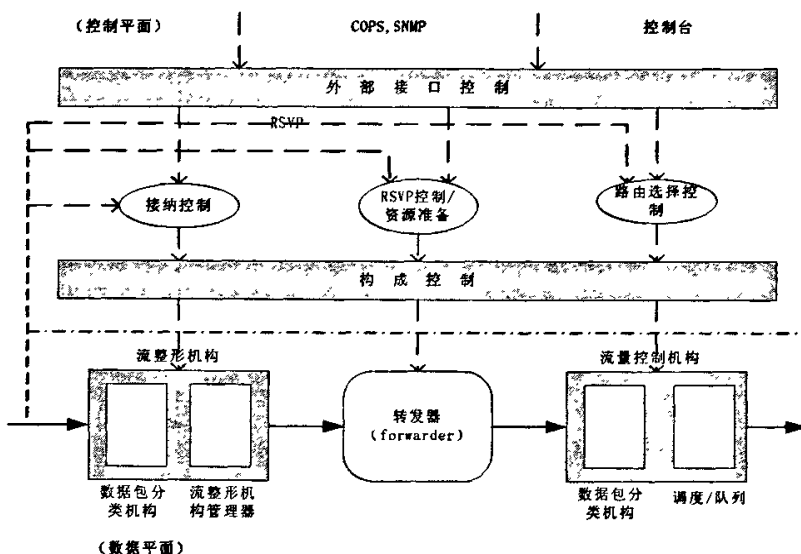


图 2.5 路由器工作原理图

控制平面

为了数据平面能够更好地工作，控制平面有参数设定、信息收集、发送等支撑功能。它分为以下几个方面

1) 接纳控制

判断从应用来的 QoS 要求是否能够被接受，并将结果回复。为此路由器管理每个流的资源信息、服务信息。

2) RSVP 控制/资源准备

设定接纳控制、流量调节机构、流量控制机构等所需要的参数。并且为此与收发主机、相邻的路由器交换需要的数据。

3) 路由选择的处理

执行通常的路由选择处理。也就是说,按照路由选择协议、开放最短路径优先等,制作路由选择表。并且,将路由选择的信息传给其他的路由器。

4) 外部接口的控制

外部接口的控制是与外部的接口。例如,使用 COPS 协议、SNMP 协议、控制接口等,执行与策略服务器和与操作员的通信。

5) 构成控制

依据从接纳控制、RSVP、外部接口传来的指令,设置数据平面所需要的操作参数。

2.3.3 接纳控制

在前面我们研究了 QoS 网络的结构和路由器的工作原理,其中我们提到了一个重要的 QoS 技术,那就是接纳控制。在网络带宽一定的情况下,为提供服务质量的保证,网络系统可承载的分组流的数量是有限的。因此,对于大规模的 IP 网络而言,要提供良好的服务质量,就必须具备执行接纳控制(Admission Control)的能力。接纳控制使得网络能够根据当前的负载状态决定是否接纳新的分组流,通过控制同一时刻网络服务的流的数量来保证服务质量。如果网络不能控制同时服务的流的数量,就可能导致这些流的服务质量要求总和超过网络能够承载的上限,从而影响这些流所获得的服务质量。因此,在当前 IP 网络传输实时分组流的要求越来越多的情况下,为传统 IP 网络引入接纳控制机制是非常必要的。因此我们下面来简要研究一下接纳控制机制。

IntServ 模型中,接纳控制机制是提供保证型服务质量保证必不可少的组成部分。在这个体系结构中,一个分组流在进入网络之前首先要通过 RSVP 向网络发出服务请求,然后由通向接收方的路径上的路由器根据该请求执行接纳控制。只有当该请求所经过的路径上的所有路由器都能满足该流对服务质量的要求时,这个流才能进入网络。虽然 IntServ/RSVP 能够提供最高级别的服务质量保证,但是由于它要求路由器维护每个流的资源预留信息以及每个流的状态信息,因此 IntServ/RSVP 的可扩展性比较差。

在 DiffServ 模型中,路由器不需要维护每个流的信息,只要求路由器能够根据分组头部携带的 DS 域信息执行类似于优先级方式的调度和缓冲机制。因此,DiffServ 不能实现端到端的资源预留和接纳控制。为了解决这个问题,文献[20]提出了基于带宽代理(Bandwidth Broker)的接纳控制算法。带宽代理实际上就是一个资源管理器,它收集网络的拓扑和节点及链路状态信息,管理网络资源,并结合策略服务器规定的策略进行接纳控制。带宽代理负责处理来自主机的带宽申请请求,根据当前网络的资源预留情况和配置的策略以及与用户签订的业务 SLA,确

定是否允许用户的带宽申请。DiffServ 域之间通过带宽代理进行 SLA 协商,使得 DiffServ 能够实现端到端的接纳控制和 QoS 保障。基于带宽代理的接纳控制的优点是不需要核心路由器来执行接纳控制,极大地降低了核心路由器的工作强度,相比 IntServ/RSVP,可扩展性较好。它的缺点是 BB 需要管理整个网络,并存储网络中的所有路径的信息。对于大型网络来说,只使用一个 BB 是不可能的,因此,大型网络采用一种分布式的结构,即将整个网络划分为多个域,每个域设置一个 BB。但是需要在各个域的 BB 之间交换域状态信息,从而增加了实现的难度。

近年来,接纳控制机制的主要研究思路从最初注重于接纳控制结果的精确性,转向以降低、避免核心状态,提高接纳控制算法的可扩展性。随着近年来 IP 网络 QoS 应用的快速发展,毫无疑问接纳控制算法研究必然是当前的一个热点。

无线 IP 网络 QoS 技术包括了多层次、多平面的技术,到目前为止我们研究了无线 IP 网络的 QoS 服务模型和 QoS 网络结构,这其中包括了多项 IP 层的 QoS 技术。下面一节我们将研究无线 IP 网络 TCP 层的 QoS 技术,即 TCP 协议在无线环境下的优化。

2.4 TCP 协议在无线环境下的优化

由于无线环境传输的特殊性,TCP 协议应用到无线环境时有必要对它进行优化。我们首先对传统的 TCP 协议进行分析。在 TCP/IP 体系中,传输层在 IP 层之上,IP 层的传输特点是:包可能丢失、重复、无序,而传输层目的是可靠的传输报文,因此,传输层应该完成的主要功能包括:通过重传来保证可靠传输,通过窗口机制实现拥塞控制和流量控制,通过 ACK(确认消息)保证端到端语义。

在上述功能中,拥塞控制和流量控制是重点。流量控制是为了防止发送方的发送速度超过接收方的接收速度;拥塞控制是为了防止发送方的发送速度超过网络容量而引入的。流量控制和拥塞控制都用到窗口机制,其基本原理是:发送者将待发送的数据流组织成窗口的形式,发送数据的速度和段目(segment)取决于当前窗口的位置和大小。通过动态调整窗口的位置和大小,从而动态调整发送数据的速度和段目。为了实现流量控制,接收者根据自己可用的缓冲空间向发送者公布一个其能接收数据的窗口大小,即接收窗口 $rwnd(receive\ window)$ 。为了防止网络拥塞,发送者根据网络的反馈来确定一个窗口,即拥塞窗口 $cwnd(congestion\ window)$ 。为了同时达到流量控制和拥塞控制的目的,发送者应动态调整其发送窗口,使得其是上述两个值的小者,即

$$\text{发送窗口} = \min\{\text{接收窗口}, \text{拥塞窗口}\}$$

如上所述,接收者根据自己可用的缓冲空间动态决定接收窗口,发送者根据

网络拥塞状态的反馈动态决定拥塞窗口。可以看出,前者通过本地反馈,后者通过网络反馈。本地反馈比较简单,而网络反馈是一个全局问题,通过网络反馈来控制拥塞窗口的变化,即拥塞控制。对于拥塞控制,首先应检测出拥塞。在有线网络下,当发送者判断包丢失时,则认为网络产生了拥塞。判断包丢失的依据有两个:(1)传输超时:在规定的时间内,发送者收不到任何 ACK,则传输超时。(2)重复 ACK:重复 ACK 是指接收者连续收到三个应答号相同的 ACK。

在检测到拥塞后,最切实的办法是降低数据传输速率,因此在检测到包丢失时,也即检测到拥塞时,TCP 除了重传丢失的包外,还应进行相应的拥塞控制,即缩小拥塞窗口等。

上述传统的 TCP 协议应用到无线环境时有必要对它进行优化,因为一些在有线环境中成立的情况在无线情况下则不一定成立。其中,最关键的两点是,在有线环境中我们认为:(1)包丢失都是由网络拥塞引起的。(2)重复 ACK 只有在包丢失时才产生。对于有线网络,这两种情况确实成立。对于第一种情况,有线网络大多数采用可靠的光纤,传输错误率低,确实可以认为包丢失是网络拥塞引起的。对于第二种情况,包丢失或乱序传递包给 TCP 都能引起重复 ACK。但是,有线网络下的包在数据链路层基本上都按顺序往上传递,所以可排除乱序引起的重复 ACK。然而,这两种情况在无线环境下都不一定成立,因为包丢失的可能原因有:网络拥塞、传输错误、主机移动、多跳网络等,重复 ACK 产生的情况有:包丢失和包乱序传递。因此,将传统的 TCP 协议运行在无线环境下的性能必然极为糟糕。例如:对于包丢失,在无线环境下由于传输错误而导致包丢失是常见的事情,如果这时也采取缩小拥塞窗口的处理,必然会使带宽浪费,正确的处理方法是尽快重发该分组。因此,对于无线网络的 TCP 协议,人们提出了一些改进。比较突出的有下面两种方法。

1) 分割 TCP 办法^[21]

如图 2.6 所示,分割 TCP(Split TCP)的基本思路是:将端到端的 TCP 拆成有线 TCP 和无线 TCP 两个连接,有线连接是指在有线主机和网关之间的连接,无线连接是指网关和无线主机之间的连接。在有线连接上,采用传统的 TCP,在无线连接上,采用改进的 TCP 或者干脆不采用 TCP。

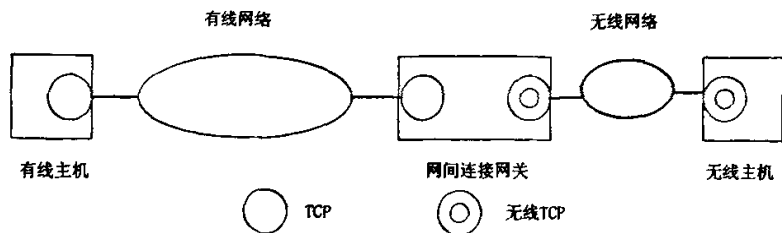


图 2.6 分割 TCP

2) 显式拥塞通知办法

显式拥塞通知 ECN(Explicit Congestion Notification)的基本思路是:在 IP 数据包的包头内设有发生拥塞位(bit),当链路上的路由器由于缓冲器溢出而检测出拥塞时,则在随后正常的数据包中写入发生拥塞信号。接收者如收到了发生拥塞信号就在反方向的 TCP 分段中加入拥塞通知信号,向发送主机发出发生拥塞的通知。发送主机收到拥塞通知信号后开始拥塞控制操作,即缩小拥塞窗口等。

在这节我们简要研究了 TCP 协议在无线环境下的优化。同样的道理,无线 IP 网络的 MAC 层和物理层要能够满足业务的 QoS 要求也需要进行相应的改进。下面一节我们将研究无线 IP 网络的 MAC 层和物理层的 QoS 技术。

2.5 MAC 层和物理层 QoS 技术

对无线 IP 网络来说,在 MAC 层优化接入算法,提高接入效率,在物理层的数字调制、功率控制、接收和检测等方面不断采用新的技术,均可提高系统的可靠性和有效性,使得 MAC 层和物理层可以支持具有 QoS 要求的应用,从而不断完善无线网络的性能。下面简单分析几种无线网络对 MAC 层和物理层的改进。

无线局域网由于技术简单、成本低廉而得到广泛的应用,然而 IEEE802.11 协议并没有内建对 QoS 的支持。传统 802.11 MAC 层定义了两种信道接入方式^[22]:基本的分布式协作模式(DCF)和可选的点协作模式(PCF)。分布式协作模式没有区分业务类型,各种业务在同一优先级下竞争信道,仅仅提供了“尽力而为”型的服务,没有任何 QoS 保证。点协作模式的 QoS 支持 also 具有很大的局限性:在非竞争期被轮询的节点发送的数据大小不可控,节点的传送时间不易被接入点控制,而且同样没有区分业务类型。因此,IEEE802.11 在 QoS 保障方面的确存在很大不足。然而 802.11 协议本身的特点,比如分布式协作模式的退避算法和帧间隔(IFS)、点协作模式的轮询算法等,给人们提供了增强 IEEE802.11 协议 QoS 性能的可能性。针对 802.11 协议的 QoS 增强主要集中在以下几个方面:在分布式协作模式中,通过修改协议参数,比如退避算法、帧间隔、最大最小竞争窗口、最大帧长度等来区分优先级;在点协作模式中,通过修改调度算法等来实现 QoS 的增强。为了有效地支持 QoS,IEEE802.11 任务组提出了 802.11e 协议。在此协议中,所有业务被分为四种接入类别,并引入了八种业务流以区分优先级。目前,基于 802.11e 草案的 WLAN 芯片已经出现,而 Wi-Fi 也已经为这一技术推出了商业化的名称——无线媒体延展(WME)。

宽带无线接入网络中,IEEE802.16 物理层采用 OFDM 技术以及自适应编码调制技术对于提高整个系统的性能以及 QoS 保证起到了非常重要的作用。OFDM 技术能够实现比单载波更高的数据传输速率和更高的频谱利用率。这种并行载波的

能力被称为多载波调制，适用于高错误率的室内或室外无线环境。在使用多载波传递数据的情况下，当一个或几个载波出现传播异常时仍然能够保持可靠的通信。而使用单载波系统时，载波出现传播异常时将在很大程度上降低通信质量，甚至使得链路不能工作。另外，自适应编码和调制是 802.16 协议保证用户 QoS 要求的一个重要技术。通常，人们用误比特率(BER)对 QoS 进行衡量。与能够保持恒定 BER 的铜缆链路不同，无线链路由于受到环境的影响存在多径、快衰、反射等因素，BER 是波动的。802.16 采用对调制和编码的自适应控制来减少环境的影响以保持一个恒定的 BER。对于实时业务来说，由于其对时延和时延抖动非常敏感，必须避免重传，所以一个恒定的 BER 对于提供可接受的 QoS 是非常关键的。

2.6 层次型 QoS 模型

前面几节研究了无线 IP 网络的多种 QoS 技术，但并未做系统化、层次化的分析，本节将这些多层次、多平面的 QoS 技术相结合，建立起一个集成了多种技术的层次型无线 IP 网络 QoS 模型，如图 2.7 所示。

该图描述了组成层次型模型三个平面：

- 1) 控制平面，包括涉及传送用户流量的路径的机制。这个机制包括接纳控制和资源准备等。
- 2) 数据平面，包含直接涉及用户流量的机制。这个机制包括拥塞控制，分组标记，队列和调度，流量分类，流量整形等。
- 3) 管理平面，包含涉及网络的操作，维护和管理。这个机制包括 SLA，流量计费和记录等。

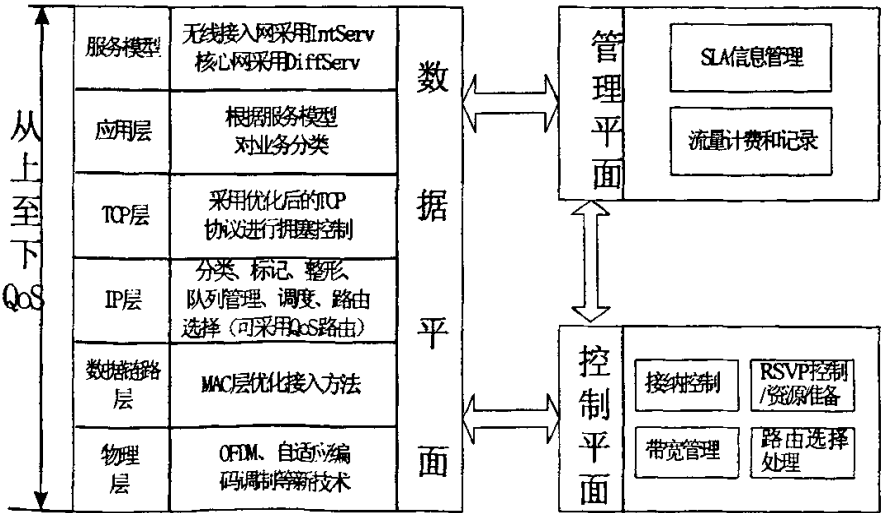


图 2.7 层次型 QoS 模型

其中在数据平面采用的是从上至下的 QoS 结构,不同的层相应地运用了不同的 QoS 技术,例如传输层采用优化后的拥塞控制,IP 层采用分组标记、队列和调度、流量分类、流量整形等。这三个层面相互联系,相互补充,从整体上很好地保证了业务的 QoS 需求。另外,在全网来看,接入网采用 IntServ 加上核心网采用 DiffServ 可以保证端到端的 QoS。

通过前面几节对这些 QoS 技术的研究,我们可以看出,采用这个层次型无线 IP 网络 QoS 模型,能够在各个层次、各个层面周全地应用各种 QoS 技术,因此能够很好地实现无线 IP 网络的 QoS 要求。

在前面的章节中,我们主要研究了无线 IP 网络的各项 QoS 技术,在后面的章节中我们将着重研究无线接入网的 QoS 技术,尤其是 IEEE802.16MAC 层的调度策略,并用 OPNET 软件对提出的调度架构进行性能仿真分析。因为我们提出的 QoS 调度架构中采用了 WF^2Q 算法,因此下章先研究 WF^2Q 算法,然后第四章开始研究 IEEE802.16 协议的 QoS 技术。

第三章 WF^2Q 调度算法研究

3.1 引言

路由器一次只能处理一个数据包,如果有多个数据流,则数据包将会在一个或多个队列中等待,需要根据一定的算法从多个队列中按照一定的顺序逐个取出数据包并发送给出出口链路。这种选择发送顺序的算法被称为调度算法。具有代表性的调度算法有 FIFO,优先级调度,WFQ 等算法。

FIFO(First In First Out)即先入先出,将流按照数据包的到达顺序置于队列中,从队列开始按顺序输出。在队列中排列的各个数据包的总数据量与这个流的输入速率成比例。因此,FIFO 队列中每个流的输出速率与流的输入速率成比例。发送数据包越快的流,获得的速率也越大。因此,FIFO 是非公平调度。

优先级调度算法(priority scheduling)中,应用给每个流设定优先级,在流的所有数据包中记入流的优先值。路由器按照优先级决定的优先度来处理数据包。例如,为每个优先级设置一个队列,将具有相同优先级的数据包按照到达的顺序放置到队列中。路由器会优先发送最高优先级的队列中的数据包。如果没有,则处理下一个优先度的队列。因此,最高优先级流的服务速率为输入速率和出口速率两者的较小者,而其他流的服务速率则取决于最高优先级的流的输入速率。当然,在剩下的流中,优先级较高的流要比优先级较低的流优先接收服务,但其结果没有任何绝对的保证。通常最低优先级的流也就是尽力而为型的流。优先级低的流的服务速率是出口链路的速率减去比该优先级高的流的输出速率总和。这个服务速率在持有与该流相同优先级的流中被共享。高优先级的流的输出速率总和越大,分配给该流的速率就越小,有时甚至可能会为零。因此,优先级调度算法也是非公平调度。

而 WFQ 是一种公平队列算法,它分配给各个流的速率与各个流的预约速率成比例,各个流的服务速率与其他流的流量无关,因此 WFQ 是公平调度。将 WFQ 算法进行改进还得到了 WF^2Q ,SCFQ^[23] 等公平调度算法。

3.2 WFQ 算法

WFQ 算法的思想在参考文献[24]中第一次被提出,但是术语 WFQ 本身并未在该文献中出现。文献中提出并分析和仿真了 FQ(公平队列)算法。在 FQ 算法中各个流的权重是相同的。只是在最后的讨论部分,文献才指出这种情况可以推广到各个流的权重不同的情况。在参考文献[25]中,作者提出了 GPS(Generalized

Processor Sharing)和 PGPS(Packet-by-packet GPS)算法, 并且指出 PGPS 和文献 [24]中的 WFQ 算法是同一个算法。下面分别研究 GPS 算法、PGPS 算法即 WFQ 算法。

3.2.1 GPS 算法

GPS 算法的思想为: 按照用户预约的速率对不同的业务进行服务, 业务之间预约的带宽可以不相等。这种调度模型如图 3.1 所示:

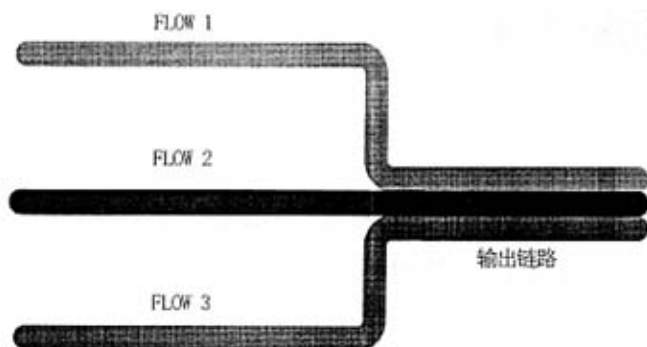


图 3.1 GPS 模型

在图 3.1 中, 每一个流被分配一个权重 $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N$, 假设总服务器的出口速率为 R , 则业务流 i 被分配到的带宽为

$$\frac{\Phi_i}{\sum_{j \in B_j} \Phi_j} R \quad \text{式 (3-1)}$$

上式中 B_j 为处于阻塞状态的业务流的集合, 称为阻塞集。这种服务模型假设业务流被连续服务, 服务器可以同时并行服务每一个流, 每一个流所获得带宽与权重成比例, 当一个流处于非空状态的时候我们就称这个流被阻塞, 或者说这个流处于活动状态。关于该服务模型的公平性做如下定义

定义 1: 一个 GPS 调度器是工作保持的(work conserving), 对 N 个队列进行服务, 并且可以用 N 个正实数 $r_1, r_2, \dots, r_n$ 来表示他们的预约速率, 且总服务速率 $R = \sum r_i$ 。设 $W_i(\tau, t)$ 为连接 i 在 (τ, t) 期间所接受的服务。若某个连接在时间 t 排队的流量为正数, 则称这个连接在时间 t 阻塞。那么 GPS 可定义为对在时间段 (τ, t) 内持续阻塞的任一连接 i , 都有下式成立

$$\frac{W_i(\tau, t)}{W_j(\tau, t)} \geq \frac{\Phi_i}{\Phi_j}, j = 1, 2, \dots, n \quad \text{式 (3-2)}$$

上式要求, 其中业务 i 必须是在时间段 (τ, t) 内被阻塞。则我们就说该系统

是公平的, GPS 中业务 i 被保证的速率为 g_i , 则 $g_i \geq \frac{\Phi_i}{\sum_{j=1}^N \Phi_j} R$ 。

不等号是因为 i 以外的连接在区间 (τ, t) 不一定总是阻塞的, 如果所有的流都是阻塞的, 则上式的等号成立。一般来说, 各个连接用他们的预约速率作为权重, 那么每个流得到的服务速率就是他们的预约速率。

图 3.2 是一个 GPS 系统工作的例子。不同的图案表示不同的业务, 其中每个业务的权重为 $\Phi_1=0.25$, $\Phi_2=0.25$, $\Phi_3=0.5$ 。因此在时间 $[0, 2]$ 之间, 业务 2、3 被阻塞, 则业务 2 分配到的带宽为 $\frac{\Phi_2}{\Phi_2 + \Phi_3} = \frac{1}{3}$, 业务 3 分配的带宽为 $\frac{\Phi_3}{\Phi_2 + \Phi_3} = \frac{2}{3}$ 。而在 $[2, 3]$ 之间, 业务 1、2、3 被阻塞, 则业务 1 分到的带宽为 0.25, 业务 2 分到的带宽为 0.25, 业务 3 分到的带宽为 0.5。

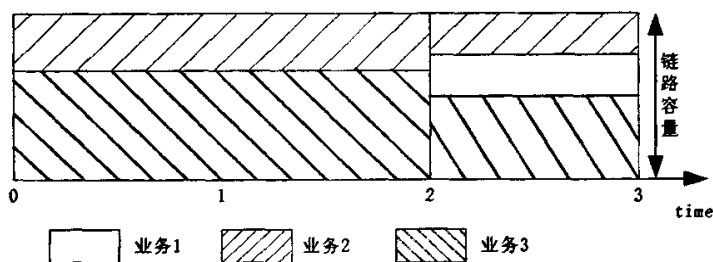


图 3.2 GPS 系统工作过程

用数学公式描述包在 GPS 系统中的调度情况为

$$S_i^k = \max(F_i^{k-1}, V(a_i^k))$$

$$F_i^k = S_i^k + \frac{L_i^k}{r_i} \quad \text{式(3-3)}$$

其中 p_i^k 表示连接 i 的第 k 个分组, a_i^k 表示 p_i^k 的到达时间, S_i^k 表示 p_i^k 的服务开始时间标签, F_i^k 表示 p_i^k 的服务完成时间标签, L_i^k 表示 p_i^k 的分组长度, r_i 表示连接 i 的预约速率, $V(t)$ 表示系统虚时间, 它是一个分段线性增长函数, 且服从下式

$$V(0) = 0$$

$$V(t_{j-1} + \tau) = V(t_{j-1}) + \frac{\tau \times R}{\sum_{i \in B_j} r_i}$$

$$\tau \leq t_j - t_{j-1}, j = 2, 3, \dots \quad \text{式(3-4)}$$

GPS 算法是一种实际上不可能实现的算法, 因为服务器不可能同时并行服务每一个流, 因此它只能作为现实逼近的目标。人们为了模拟 GPS 算法提出了 PGPS 算法。下面研究 PGPS 算法即 WFQ 算法。

3.2.2 WFQ 算法

WFQ 算法的思想为: 假定在时间 τ 以后系统无分组到达, 调度器选择在相应的 GPS 系统里最先完成服务的分组进行服务。则该调度器为 PGPS(Packet-by-Packet GPS)。根据参考文献[25], GPS 系统的分组服务完成的顺序与将来的分组到达无关, GPS 与其对应的 PGPS 之间存在下列性质。

$$d_{i,PGPS}^k - d_{i,GPS}^k \leq \frac{L_{\max}}{R}, \forall i, k \quad \text{式(3-5)}$$

$$W_{i,GPS}(0, \tau) - W_{i,PGPS}(0, \tau) \leq L_{\max}, \forall i, \tau \quad \text{式(3-6)}$$

其中 $d_{i,PGPS}^k$ 和 $d_{i,GPS}^k$ 分别表示连接 i 的第 k 个分组在 PGPS 和 GPS 中的离开时间, 而连接 i 在 GPS 和 PGPS 下所接收的服务分别用 $W_{i,GPS}(0, \tau)$ 和 $W_{i,PGPS}(0, \tau)$ 来表示。

上面对 WFQ 算法的思想做了简单的介绍, 然而 WFQ 算法是一个很难描述清楚的算法, 为了清晰地描述该算法, 人们一般用以下定义和定理来描述该算法^[26]。

令 $F_{i,j}$ 表示连接 i 的分组的完成标签的最大值, 即连接 i 的队尾分组的完成标签。

定理 1: GPS 分组系统的阻塞更新事件为下列事件的任一事件:

① τ 时刻某个连接有分组 p_i^k 到达, 并且满足 $V(a_i^k) \geq F_i^{k-1}$, 设 $F_i^0 = 0$, 将连接 i 加入阻塞集。

② τ 时刻某个队列的 $F_{i,j} = V(\tau)$, 将连接从阻塞集中删除。

定义 2: 若某个分组调度系统按照式(3-3)为分组加标签, 按定理 1 的阻塞更新事件来更新系统的阻塞集合, 分组选择策略为 SFF, 即选择最小完成时间标签的分组服务, 按下式计算系统虚时间:

$$V(t_2) - V(t_1) = R \times (t_2 - t_1) / \sum r_i, \forall i \in B(t_1, t_2) \quad \text{式(3-7)}$$

若 (t_1, t_2) 内阻塞集不变, 则称该系统为加权公平排队系统, 简称 WFQ。这里要注意的是: WFQ 系统的阻塞集表示的是在对应的 GPS 系统中阻塞的连接的集合, 而不是实际的采用了 WFQ 的系统的阻塞集合^[27]。

3.3 WF²Q 算法

从上面的分析可以看出, WFQ 算法有着与 GPS 算法相差不多的时延特性, WFQ 算法与 GPS 算法有以下关系:

$$d_{i,WFQ}^k - d_{i,GPS}^k \leq \frac{L_{\max}}{R}, \forall i, k \quad \text{式(3-8)}$$

$$W_{i,GPS}(0, \tau) - W_{i,WFQ}(0, \tau) \leq L_{\max}, \forall i, \tau \quad \text{式(3-9)}$$

WFQ 算法保持了 GPS 算法有时延边界的特性, 但它的时延只能保证最多滞后于 GPS 系统 $L_{\max}/R$, 不能保证超前多少, 也不能保证各个队列公平分配系统的时延, 可能会造成系统时延抖动过大, 图 3.3、图 3.4 和图 3.5 是一个 WFQ 系统的安排分组的过程, 通过下面这几副图的分析我们可以看出 WFQ 算法还不能足够精确地接近 GPS 算法。

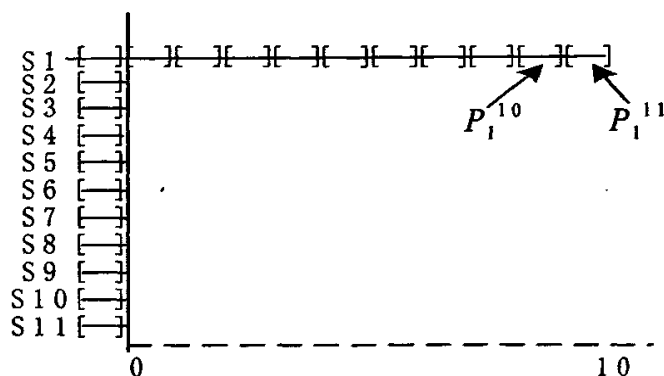


图 3.3 包到达顺序

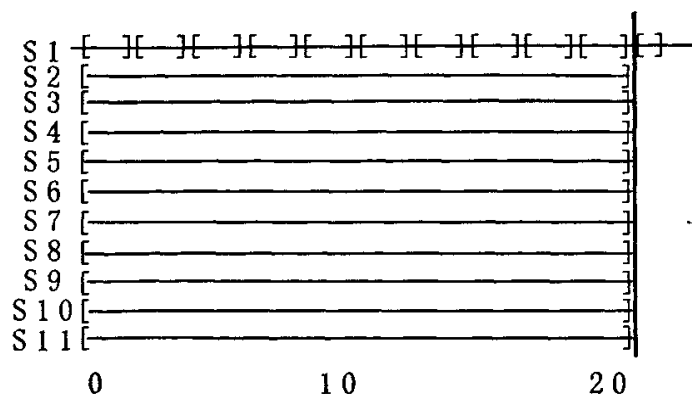


图 3.4 GPS 服务顺序

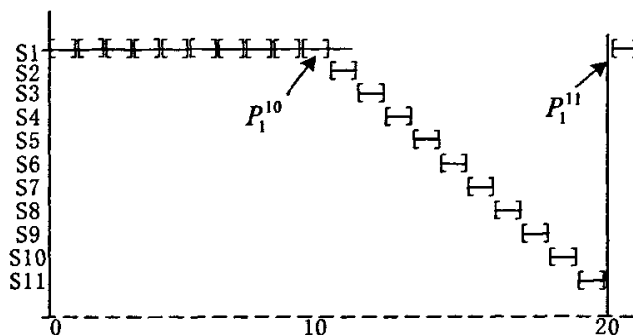
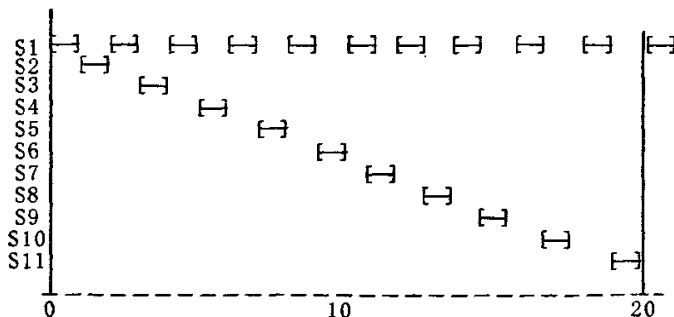


图 3.5 WFQ 服务顺序

设业务 1 每单位时间发送一个分组, 共发送 11 个分组, 业务 1 的权重为 0.5。设业务 2 到业务 11 仅在时间 0 发送一个分组, 各队的权重为 $1/20$, 所有分组长度相等都为 $L_{\max}$ 。则系统分组到达时序为图 3.3 所示。GPS 服务分组服务时序和 WFQ 分组服务时序分别如图 3.4 和图 3.5 所示。由此可见 WFQ 存在的问题是对流超前 GPS 的时间没有一种有效的保证。因此, 为了解决以上问题, Bennett 等人提出了 WF^2Q (最坏情形公平加权公平队列) 算法^[25], 使得输出业务以相当平滑的方式输出, 比 WFQ 算法更加精确。WF²Q 算法的内容如下:

WF²Q 是一种几乎完全近似于 GPS 算法的调度算法, 它与对应的 GPS 算法之间的差不大于一个分组的长度。WF²Q 算法是在 WFQ 算法的基础上修改而成的, 它与 WFQ 算法之间的差别在于: WFQ 算法采用 SFF 准则, 而 WF²Q 算法采用 SEFF 准则。即在 WFQ 算法中, 服务器选择所有的在 t 时刻有分组的流中在对应的 GPS 系统中最先完成服务的分组; 而在 WF²Q 算法中服务器选择在 t 时刻在对应的 GPS 系统中已经开始对这个包进行服务的流中最先完成服务的分组。因此 WF²Q 算法缩小了分组选择的范围, 使得调度更加精确。

图 3.6 是采用 WF²Q 算法的示意图。从中可以看到与 WFQ 算法相比, S1 以分散的方式被服务; 而在 WFQ 算法中, S1 被服务的过程有较大的中断, 因此时延的抖动会比较大。而 WF²Q 算法能有效的控制时延, 迫使算法的性能比较好地接近于理想的 GPS 系统。

图 3.6 WF^2Q 服务顺序

根据文献[28], WF^2Q 算法与 GPS 算法有以下关系:

$$d_{i,WF^2Q}^k - d_{i,GPS}^k \leq \frac{L_{\max}}{R}, \forall i, k \quad \text{式(3-10)}$$

$$W_{i,GPS}(0, \tau) - W_{i,WF^2Q}(0, \tau) \leq L_{\max}, \forall i, \tau \quad \text{式(3-11)}$$

$$W_{i,WF^2Q}(0, \tau) - W_{i,GPS}(0, \tau) \leq (1 - \frac{r_i}{R})L_{\max}, \forall i, \tau \quad \text{式(3-12)}$$

从以上研究看出, WF^2Q 算法比 WFQ 算法更加精确, 更加接近于 GPS 算法, 但是其虚时间函数的计算复杂度却未发生变化。于是, 后来又提出了 WF^2Q+ 算法, 对虚时间函数的计算进行了改进, 将复杂度降低。而且实现了同 WF^2Q 接近的实验性能和公平性。在下章我们将研究采用 WF^2Q 算法的 802.16MAC 层 QoS 调度方法。

第四章 IEEE802.16QoS 技术研究

4.1 IEEE802.16 协议概述

IEEE802.16 协议描述了一个点到多点的固定宽带无线接入系统的空中接口,包括 MAC 层和物理层两大部分。IEEE802.16MAC 层能支持多种物理层规范,以适应各种应用环境。MAC 层主要功能包括系统接入、带宽分配、连接建立和连接维护等,并对物理层上传输和调度的数据实施 QoS 控制。物理层使用突发数据传输格式,支持自适应的突发业务数据,传输参数(调制方式、编码方式、发射功率等)可以动态调整,但是需要 MAC 层协助完成。

IEEE802.16 的 MAC 层支持点对多点的宽带无线接入应用,主要是在上行和下行链路上进行高速传输。为了让多个用户共享一个物理信道,MAC 层必须要有有效的接入和带宽分配算法以支持各种业务的 QoS 保证。标准定义了四种不同的业务类型,IEEE802.16 可以根据不同的 QoS 动态地分配带宽,具有较大的灵活性。IEEE802.16MAC 层是基于连接的,连接映射到一个业务流,业务流为该连接上传输的数据定义了 QoS 参数。一个用户站(SS)以基于每条业务流的方式请求上行带宽。基站(BS)在某个时间调度间隔内,或者对一个 SS 的所有请求总地授予一个带宽,或者按每个连接来授予带宽。因此,IEEE802.16 可以在无线接入网部分为不同业务提供不同质量的服务。关于 MAC 层具体的 QoS 策略我们将在后面详细研究。

IEEE802.16 物理层支持时分双工(TDD)和频分双工(FDD)模式。两种模式下都采用突发(Burst)格式发送。在每一帧中,BS 和各个 SS 可以根据需要灵活地改变突发的类型,从而选取适当的发射参数,如调制方式、编码类型等。上行时,物理层基于时分多址(TDMA)和按需分配多址接入相结合的方式。上行信道被划分成许多个时隙,初始化、竞争、数据传输等都是通过占用一定数量的时隙来完成的,其占用的数量由 BS 的 MAC 层统一控制,并根据系统性能优化要求而动态地改变。下行信道采用时分复用(TDM)方式,BS 将产生的信息复用成单个的数据流,广播给扇区内的所有 SS。每个 SS 接收到广播消息后,在 MAC 层提取出发送给自己的信息,丢弃其他的消息。802.16 的帧结构如图 4.1 所示。

帧结构分为上行子帧和下行子帧,上下行子帧的边界可以滑动,因此上下行的带宽可以不对称。每一个上行子帧被分为固定大小的微时隙,其中一部分由初始化测距竞争时段和带宽请求竞争时段所组成的,这两个时段并不是固定位置和大小,而是根据需要动态分配,剩下的部分由上行突发 UL_Burst 组成。MAC 层利用请求/授予(Request/Grant)机制来协调多个 SS 之间的传输。如果一个 SS 需

要在上行信道上发送数据它必须先请求，然后 BS 才会发送一个能够传输一定数量数据的传输机会给 SS。下行子帧是由前导码、MAP 信息、DCD/UCD 信息、DL_Burst 组成。前导码可以用来指示帧边界和用于帧同步；MAP 信息用来指示上下行子帧中的资源分配情况；DCD/UCD 是用来对上下行子帧中调制方式和纠错编码方式进行指示；DL_Burst 就是下行突发，它是用来将资源分块分配给不同的 SS。

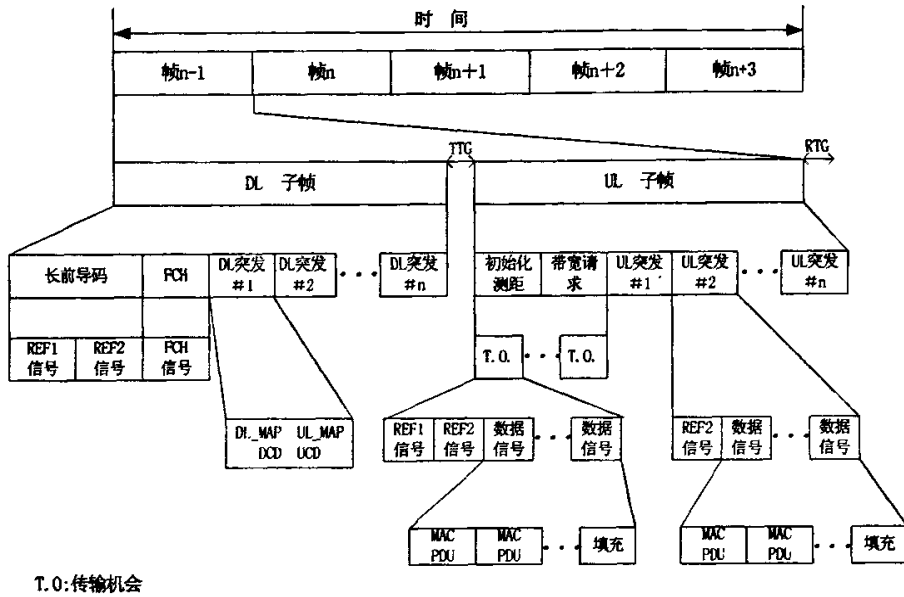


图 4.1 IEEE802.16 帧结构

BS 在下行信道周期性地发送 MAP 信息来给 SS 指出上行信道上的资源分配情况，SS 根据接收到的 MAP 就能判断出上行信道哪些时隙是给自己的。在 MAP 信息中，BS 除了要给 SS 指出资源分配情况，还要指出一段竞争时期用于 SS 通过竞争的方式向 BS 发送带宽请求。当一个 SS 通过竞争请求获得一次传输数据的机会，那么它就可以通过捎带(PiggyBack)的方式来请求其他的上行信道带宽。

经过这节的分析，我们对 IEEE802.16 协议及其帧结构有了比较清楚的了解，后面一节我们将详细研究 IEEE802.16MAC 层的 QoS 策略。

4.2 IEEE802.16MAC 层的 QoS 策略研究

4.2.1 802.16MAC 层 QoS 策略

无线接入网是整个无线 IP 网络的瓶颈，因此无线接入网的 QoS 问题显得尤

为突出和重要。目前固定宽带无线接入主要采用的是 IEEE802.16 协议^[29], IEEE802.16 宽带无线接入标准最突出的特点就是在其 MAC 层引入了完整的 QoS 机制, 可以为用户提供电信级的 QoS 支持, 这在宽带无线接入网发展里程中具有重要的意义。本节将详细研究此协议 MAC 层的 QoS 策略。

业务流是 MAC 层的一个重要概念, 一条业务流就是一条提供特定 QoS 的单向数据包流。IEEE802.16 中提供 QoS 的核心机制是将通过 MAC 接口的数据包与一条由连接标识符(CID)标识的业务流关联起来。以使得该数据包获得该业务流的 QoS 支持。业务类型和其他当前参数都包含在 CID 当中。MAC 协议内的 QoS 策略大致可分为三个部分: 首先是初始化和鉴权; 其次是业务流管理, 包括创建业务流并对业务流的 QoS 参数进行动态管理; 最后是在通信过程中对上层来的数据包进行分类映射并依据业务流的类别进行区分优先级的调度^[30]。下面对这三个过程分别进行研究。

1) 初始化和鉴权

初始化和鉴权是 IEEE802.16 协议的重要组成部分, 该协议定义了用户进入网络、进行身份识别以及 QoS 合同鉴权等过程。协议规定通过 x.509 许可(一个硬件写入到每个 IEEE802.16 设备的唯一识别签名)进行身份识别并映射到恰当的服务等级协议(SLA)上。

2) 业务流管理

一条提供特定 QoS 的单向数据包流被定义为一条业务流。SS 和 BS 依据为该业务流定义好的 QoS 参数提供相应的 QoS 服务属性。为了标准化 SS 及 BS 之间的操作, 这些属性包括 SS 如何请求上行带宽的细节以及 BS 上行调度器相应的具体行为。业务流提供了一条实现上下行 QoS 管理的机制。系统的上下行带宽在不同的业务流之间进行分配。

业务流可以通过注册或动态业务流添加(DSA)消息建立, 每条业务流将获得一个业务流标识符(SFID), 并拥有三个 QoS 参数集, 指派 QoS 参数集(Provisioned QoS ParamSet)、已接纳 QoS 参数集(Admitted QoS ParamSet)和激活参数集(Active QoS ParamSet)。指派 QoS 参数集就是对业务流进行配置时指定的 QoS 参数集。配置可以是静态的, 也可以是动态的。系统可以在配置业务流时就对其资源要求是否能被满足进行审查, 也可以在创建业务流时对其资源要求进行审查。被接纳的 QoS 参数集是通过注册或动态业务流管理过程被 BS 接纳了的 QoS 参数集。BS 必须为接纳了的业务流按被接纳的 QoS 参数集要求预留资源。预留资源并不意味着资源实际被占用, 其实在业务流被激活前没有占用任何资源。激活的 QoS 参数集是通过注册或动态业务流管理过程被激活了的 QoS 参数集。BS 为处于激活状态的业务流提供其实际需要同时又不大于被接纳的 QoS 参数集的资源。业务流实际占用的资源有可能小于其要求预留的资源, 这种情况下 BS 可以通过带宽动态分配

算法将该业务流中申请预留而暂时没有使用的资源分配给其他业务流使用。同一条业务流的三个 QoS 参数集满足如下关系：激活 QoS 参数集为已接纳参数集的子集，已接纳 QoS 参数集为指派参数集的子集。

业务流主要可以分为三类：指派、已接纳以及激活的业务流。指派业务流的已接纳 QoS 参数集和激活 QoS 参数集均为空。已接纳业务流拥有 BS 按照其已接纳 QoS 参数集的内容为其预留的资源，但并未实际占用，其激活 QoS 参数集为空。BS 可以通过动态带宽分配算法将这些资源分配给其他业务流使用。激活的业务流实际占用 BS 按照其已接纳 QoS 参数集为其安排的资源，其已接纳 QoS 参数集和激活 QoS 参数集均为非空。

当业务流被激活或接纳时还将获得一个 CID。业务流可以通过一些 MAC 层管理消息动态地创建、改变或删除。动态是指这些操作在对应的 SS 正常通信过程中进行。DSA 消息动态创建一个新的业务流，动态业务流改变消息动态改变一个已经存在的业务流的 QoS 参数集，动态业务流删除(DSD)消息动态删除一个单独存在的业务流。

当上层数据单元通过 MAC 层接口到来时，首先使用分类器将其分类并映射到各个激活的业务流上。分类器就是对进入系统的每一个数据单元（数据包或 ATM 信元）进行分类的匹配标准。ATM 类信元的匹配标准为虚路径标识符(VPI)和虚信道标识符(VCI)等，数据包的匹配标准为 IP 地址等。分类器和 CID 相关联，如果 ATM 信元或数据包与某分类器匹配则该 ATM 信元或数据包将被传递交给与此分类器相关联的 CID 所定义的连接。该连接的业务流特性为该数据单元提供相应的 QoS。接下来就是对业务流的调度工作。

3) 业务流的调度

IEEE802.16 是利用带宽请求/授予机制来协调多个 SS 之间的传输。如果一个 SS 需要在上行信道上发送数据它必须先请求带宽，然后 BS 才会分配一个能够传输一定数量数据的传输机会给 SS，BS 在每一帧的下行子帧上发送 MAP 信息来给 SS 指出上行信道上的资源分配情况。SS 有多种带宽请求方式，除了轮询带宽请求方式，SS 也可以通过竞争的方式向 BS 发送带宽请求，还可以通过 PiggyBack 方式来捎带带宽请求。

MAC 层中对下行服务流的调度未做具体规定，而将上行业务流分为四种类型：主动授予业务(UGS)、实时轮询业务(rtPS)、非实时轮询业务(nrtPS)和尽力而为(BE)业务。MAC 层对上行业务流进行分类的目的是提高轮询/授权效率。通过指定上行业务流的调度类型和相应的 QoS 参数集，BS 能够较好地预测上行业务流的吞吐量和时间，从而在适当的时间提供轮询或授权传输机会。与这四种调度服务相关的关键 QoS 参数包括：最大持续速率(MSR)、最小保证速率(MRR)、最大时延(maximum latency)、最大时延抖动(maximum jitter)以及优先级。MSR 对一个连接

的最大速率进行限制, 以 bit/s 为单位。业务流被监管, 使其在无线链路上的数据速率满足该参数。MRR 在四种调度服务中均被使用, 它规定了为一个业务流保留的最小数据速率。下面分别研究这四种服务类型。

(1) 主动授予业务(UGS)

UGS 用来支持周期性的、包大小恒定的实时业务流 (例如 VOIP)。BS 对于这类业务流主动提供周期性的固定大小的传输机会, 也就是说这一类流一旦申请成功, 在传输的过程中就不需要再去发送带宽请求。因此这一类流不允许使用任何单播轮询或竞争请求机会 (单播轮询是 BS 单独给一个指定的 SS 分配的发送带宽请求的机会), 也不允许使用捎带(piggyback)请求。但 SS 可以通过 PM 比特的设置为同一 SS 下的其他非主动授予业务流请求单播请求机会。如果需要改变某个带宽授予周期内的带宽授予数目, SS 必须启动 DSC 过程。

UGS 业务流的主要参数是: Grant Size (授予大小)、Grant Per Interval (授予间隔)、Tolerated Grant Jitter (可容忍的时延抖动)。因此从图 4.2 中看出: 实际的包发送时间至少应该在 $(t_i, t_i + \text{jitter})$ 之间。

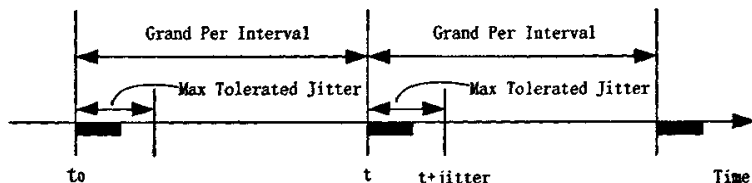


图 4.2 UGS QoS 参数

(2) 实时轮询业务(rtPS)

rtPS 支持周期性的、包大小可变的实时业务流 (例如 MPEG 视频流)。这类业务有具体的带宽要求以及最大时延限制, BS 为这样的流提供周期性的单播轮询带宽请求机会(Unicast Polling), 用于 SS 向 BS 发送请求指示该业务流每一个包的大小。SS 被禁止使用任何竞争或捎带请求的方式来申请带宽。这一类业务的主要 QoS 参数是: Polling Interval (轮询间隔)、Tolerated Polling Jitter (可容忍的轮询时延抖动)、Minimum Reserved Traffic Rate (最小预约速率)。这些参数和 UGS 流的参数很相似。

(3) 非实时轮询业务(nrtPS)

nrtPS 业务支持非周期的、包大小可变的非实时业务流。例如, 有最小保证速率要求的因特网接入连接。这一类业务流对时间不敏感, 但有最小带宽要求。这一类业务流也需要周期性的单播轮询带宽请求机会供其发送带宽请求。另外, SS 也可以用竞争和 PiggyBack 的方式来请求带宽, 在带宽请求中将包含当前队列的长度。这里的主要 QoS 参数有: Polling Interval、Minimum Reserved Traffic Rate (最

小预约速率)。

(4)尽力而为业务(BE)

BE 业务不提供数据速率和时延的保证,SS 允许使用竞争和捎带请求的方式发送带宽,但是不允许他们使用任何单播轮询的请求机会。因此这一类业务的带宽请求完全靠竞争,带宽请求将包含当前队列的长度。BE 业务流的主要参数为 Traffic Priority (传输优先级)。

4.2.2 802.16MAC 层 QoS 结构模型

根据上节对 MAC 层的 QoS 策略的研究,我们可以构建出一个 IEEE802.16 的 MAC 层 QoS 结构模型^[31],如图 4.3 所示。这个模型可以分为带宽管理机制和流处理机制两大类。带宽管理机制包括接入控制和资源预留。流处理机制包括分类、包调度、流监控等。目前宽带无线接入系统常用的调度方法包括先进先出(FIFO)、循环调度(RR)、加权公平队列(WFQ)以及基于分类的调度(CBQ)等。

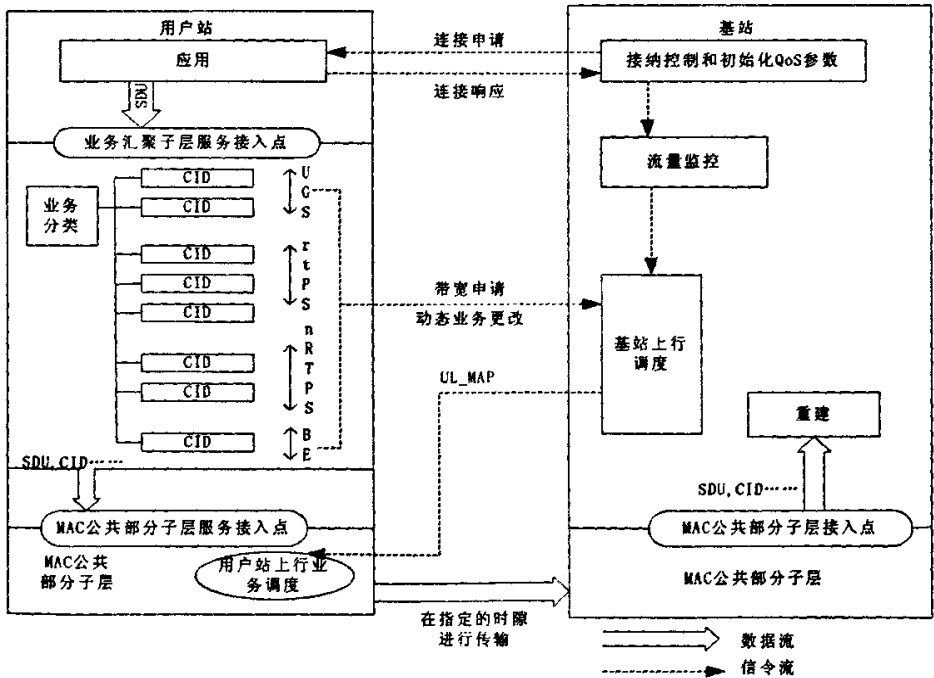


图 4.3 IEEE802.16MAC 层结构

首先对带宽管理机制进行研究,带宽管理机制分为接纳控制以及资源预留。在业务流初始的建立和后来的动态管理中,都需要经过授权模块的同意,此时授权模块完成的就是接纳控制的功能;每条业务流的 QoS 参数集合的状态对应业务流的三种状态,业务流在三种状态之间的转变过程中完成对资源的预留。具体来

说,在接纳这个新连接时,只有当这个新连接以及已经存在的连接在带宽和时延上的 QoS 均能够得到保证时,BS 才会接纳这个新连接。仅主动授予业务、实时轮询业务、非实时轮询业务需要接纳控制,尽力而为业务不需要接纳控制。

对于流处理机制,分类器的功能是由特定业务汇聚子层(CS)完成的,它将不同的上层业务数据包分为不同的业务流。然后将这些业务流送到调度器进行调度。调度器的功能分别由 BS 和 SS 来完成,一般来说带宽请求是以连接为基础,而带宽授予则是以用户站为基础的。在各个 SS 之间的上行调度是由 BS 中的上行包调度器完成的,各个 SS 内部的上行调度由 SS 中的上行包调度器完成。由于 802.16 业务主要分为有严格优先级区分的四种类型,每种业务内的数据包 QoS 要求和优先级又各不相同,因此采用分层调度的方式是较为合理的。具体的调度方法在后面的章节会详细加以研究。

4.3 IEEE802.16MAC 层 QoS 调度架构

4.3.1 调度机制

IEEE802.16 协议中仅仅简单地提出了 MAC 层的四种业务类型,而具体的上行调度实现是留给厂家设计的。由于 SS 和 BS 的调度机制是相同的,所以我们以 BS 为代表来研究 QoS 调度架构。我们在后面将提出一种新颖有效的 QoS 调度架构。该调度架构能够有效地区分业务类型,使得不同类型的业务流能满足 QoS 要求。下面首先简单分析一下 IEEE802.16MAC 层的调度机制。

对于 UGS 业务为其维持如表 4.1 的特征表,用于定期给 SS 分配相应的带宽来发送 UGS 业务流。

表 4.1 UGS 业务特征表

FLOW SID	参考起始时间	Grant Interval	Grant Jitter	Grant Size	Oher Date
1	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*

对于 rtPS 业务流的关键在于 Polling Interval 如何设置。RtPS 业务流的每一个包大小可能不相同,因此这一类流的每一个包都要将实时性要求(Deadline)和带宽要求发送给 BS。为了实现这个功能,给每个包一次传送的机会,我们可以在每一次为业务分配带宽的时候顺便多分配一点带宽为其下一个包的发送请求提供带宽。对于这样的实时业务流可以采用 EDF(Earliest Deadline First)调度机制。

对于 nrtPS 流也存在如何设置 Polling Interval 的问题。这里轮询的目的是为了保证在网络拥塞情况下 nrtPS 流依然可以获得一些带宽请求机会,这就可以保证重

业务流量的 nrtPS 流可以获得一定的最低速率。因此轮询的间隔可以远远大于 rtPS 业务流的轮询间隔。对于这一类业务流可以采用 WF^2Q 算法来调度, 根据其预约速率来确定权重。

BE 业务流不提供数据速率和时延的保证, 完全采用竞争的机制来发送带宽请求, 因此业务流对 QoS 的要求较低, 可以采用以优先级为权重的 WF^2Q 算法来调度他们。

4.3.2 QoS 调度架构

IEEE802.16 用于无线信道, 无线信道与有线信道相比具有很大的特殊性, 它表现在: (1) 带宽有限 (2) 信道具有位置依赖型 (3) 突发和高的信道误码。考虑到对带宽的充分利用, 当由于误码或其他原因造成某一正在传递数据的连接暂时中断, 系统应该将该连接所占带宽临时分配给别的连接, 这就是带宽的再分配; 为了实现公平性, 在暂时中断服务的连接恢复正常后, 获得额外服务的连接应当能做出补偿, 这就是无线调度中的带宽补偿。因此 IEEE802.16 的调度架构除了能够区别并保证不同服务类型业务的 QoS 要求外, 还应该能够进行链路中断后的带宽再分配和带宽补偿。

目前人们已经提出了一些对 802.16MAC 层调度架构的研究, 但大都考虑得不全面。例如文献[35]考虑了服务类型, 但未考虑无线环境下的带宽补偿; 文献[32]和[36]考虑了服务类型并采用了带宽补偿, 但文献[32]的补偿方式实际是惩罚低级别的业务, 挤占了低级别的带宽, 而文献[36]的带宽补偿方法不够灵活。因此本节提出了一个新的、有效的适合于 802.16MAC 层的 QoS 调度结构。

该 QoS 调度架构中采用了分层调度的思想, 对于不同类型的业务依次按照优先级进行调度, 而在每种类型的业务中又选择恰当的算法分别进行调度, 该调度架构还能在无线信道发生突发错误导致链路中断时, 灵活地进行带宽的再分配以及在链路恢复后灵活地进行带宽补偿。因此, 该调度架构能很好地适用 802.16MAC 层。

该调度架构将 UGS、rtPS、nrtPS、BE、rtPS-Polling、nrtPS-Polling 都作为业务来统一调度。整个调度架构如图 4.4 所示。

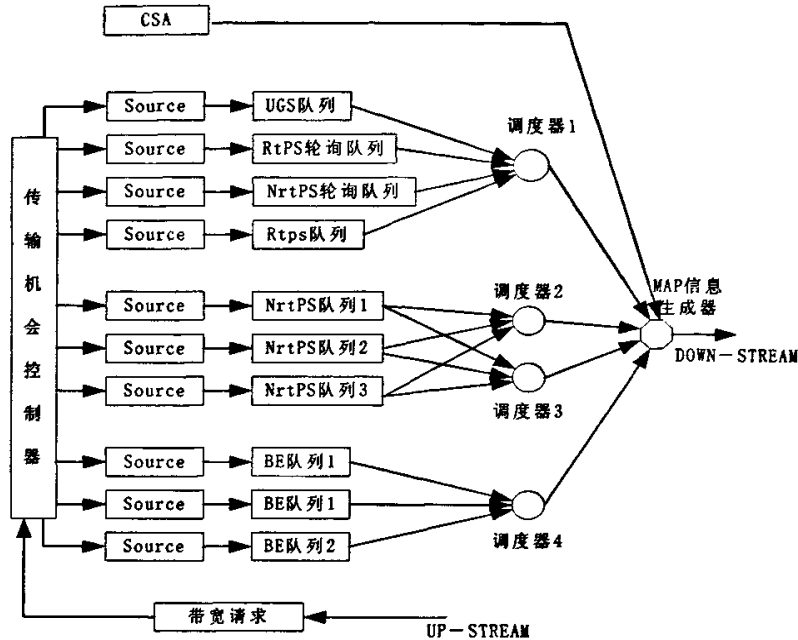


图 4.4 QoS 调度架构

整个 QoS 调度架构有六个重要的部分：

1) CSA

CSA(Contention Slot Allocator)称为竞争时隙分配器^[33]，采用动态分配的机制，可以根据网络竞争的情况合理选择竞争时隙的多少，使网络的性能达到最佳。这一部分是关系到整个网络效率和性能的一个重要的组成部分，在本节不做深入的研究。

2) 调度器 1

调度器 1 负责调度实时业务流，其中每一个业务流都维持一个队列，队列中的每一个元素都是一个传输机会或带宽请求机会，每一个元素都要标记一个被调度的时间范围($t_i, t_i + \text{jitter}$)，也就是说这个传输机会或带宽请求机会必须在这个时间段内被调度，这是个硬性指标必须满足，否则不能满足实时性的要求。这些实时流分为 UGS 业务流、rtPS 轮询流、nrtPS 轮询流、rtPS 业务流四种。UGS 业务流根据分类器在上行流中接收到的流的 QoS 参数(Grant Size、Grant Per Interval、Tolerated Grant Jitter)来控制源每隔一段时间产生一个传输机会，并给每一个传输机会注明被调度的时间范围。RtPS 轮询流根据分类器在上行流中接收到的 rtPS 流的 QoS 参数(Polling Interval、Tolerated Polling Jitter)来控制源产生一个单播轮询带宽请求机会。NrtPS 轮询流产生方法与 rtPS 轮询流产生方法相同，只是具体参数值不同。它是根据网络的繁忙程度控制其产生业务流的速度，当网络较空闲的时候轮

询流产生的速度就慢,当网络繁忙的时候产生的速度就快。对 nrtPS 业务流的处理是根据上行信道接收到的带宽请求来决定给 nrtPS 业务流注入传输机会的大小和被调度的时间范围。因此调度器 1 的调度准则为 EDF(Earliest Deadline First),即优先调度具有最早时限的传输机会。

3) 调度器 2

调度器 2 负责调度有最小带宽预约的 nrtPS 业务流。这一类调度器采用 WF^2Q 算法来保证各个流预约到相应的带宽,每一个流的权重就是其预约的带宽的大小。并且调度器 2 分配给 nrtPS 业务流的总带宽为所有 nrtPS 业务流预约速率的总和,经过调度后各个业务流获得的带宽就是他们的预约速率。当一个 nrtPS 业务流实际传输速率小于预约的传输速率的时候,可能是因为网络阻塞或其他原因,则调度器可以给 nrtPS 业务流分配更多的轮询机会。同时 SS 也可以通过上行信道发送一些管理消息来改变一个 nrtPS 业务流的预约带宽的大小,也就是通知调度器 2 改变相对应的流的权重。当某一连接链路出现故障时调度器 2 的调度策略也要进行相应的调整,在下面部分我们将进行介绍。

4) 调度器 3

调度器 3 中含有一个 FIFO(先进先出)队列,负责处理无线连接链路中断情况下的调度。处理包括链路中断后的带宽再分配和链路恢复后的带宽补偿。

带宽再分配具体方法如下:如果是 UGS 等实时业务流的连接中断,因为其他的实时业务流是固定比特率的,不需要额外的服务,所以将它的带宽分配给 nrtPS 业务流或 BE 流;如果是 nrtPS 业务流的连接中断,则将其带宽分配给其他的 nrtPS 业务流;如果是 BE 业务流的连接中断,则将其带宽分配给其他的 BE 流。

带宽补偿的具体方法如下:UGS 等业务流实时性很强,若连接恢复后再对连接做出带宽补偿没有多大意义。而 nrtPS 流业务量繁重,一旦连接中断必然导致大量数据滞留,必须在其连接恢复后做出带宽补偿。所以该调度架构的带宽补偿策略主要是针对 nrtPS 流的。对于 BE 业务,由于其对带宽要求不高,是否做出带宽补偿是可选的,其补偿策略和 nrtPS 业务流相同。NrtPS 流的带宽补偿策略如下:

当连接 i 中断后,各个连接的开始时间标签,完成时间标签等计算方法仍不变,调度器 2 仍按照 SEFF 准则调度其他的流,只是把连接 i 队列的传输机会传送到调度器 3 中的 FIFO 队列,这时调度器 2 分配给 nrtPS 业务流的总带宽仍然为所有 nrtPS 业务流预约速率的总和。所以其他 nrtPS 业务流总共多获得的带宽就是连接 i 的预约速率 r_i ,并且每条连接多获得的带宽是与他们的预约速率成正比的。连接 i 链路中断恢复后,调度器 2 恢复调度所有的流连接, i 停止传送传输机会到调度器 3。接下来 MAP 信息生成器分配值为 r_i 的带宽给调度器 3,直到调度器 3 中所有的滞留传输机会均传输完毕,则 MAP 信息生成器不再给调度器 3 分配带宽。链路中断恢复后调度器 2 的策略为:当链路比较空闲时,系统有足够的剩余带宽补偿连接 i ,

则无需其他 nrtPS 业务流偿还多获得的带宽,那么调度器 2 分配给 nrtPS 业务流的带宽仍然为所有 nrtPS 业务流的预约速率的和。当链路比较繁忙时,则其他业务流必须偿还多获得的带宽,那么调度器 2 分配给 nrtPS 业务流的带宽变为所有 nrtPS 业务流的预约速率之和 R 减去连接 i 的预约速率,即 $R-r_i$,并且其他连接的权重调整为 $(R-2 \times r_i)/(R-r_i)$ 倍,经过计算我们可以得到这样调度后其他连接获得的带宽总共为 $R-2r_i$,比原来的带宽少了 r_i ,也就是说这时候其他业务流将值为 r_i 的带宽偿还给了连接 i 。判断链路是否繁忙,可以根据总调度器调度完所有的业务后剩余的带宽是否大于 r_i 来看,当大于 r_i 时,则不用其他 nrtPS 业务流偿还带宽;当小于 r_i 时,则其他业务流必须偿还多获得的带宽。当带宽偿还完毕,调度器 2 又自动按照以前的调度策略调度 nrtPS 业务流。

我们可以看出,本调度架构采用的带宽补偿策略分为链路繁忙和空闲两种情况,在链路空闲时,系统几乎不用做任何改动,只需 MAP 信息生成器分配值为 r_i 的带宽给调度器 3 就可以了。因此该调度架构相比于其他调度架构来说是很灵活的。

5) 调度器 4

调度器 4 是一个根据队列的优先级对业务进行调度的系统。BE 业务是一种尽力而为的业务,但是不同的 BE 业务可以用优先级来代表业务的优先次序。因此,在调度器 4 中对 BE 业务也采用 WF^2Q 算法,把优先级作为业务的权重来进行调度。

6) MAP 信息生成器

MAP 信息生成器负责处理 CSA,调度器 1,调度器 2,调度器 3,调度器 4 的总体调度,把传输机会依次安排到每一帧的 MAP 信息中去。具体生成规则如下:MAP 信息生成器从 CSA 中取出竞争时隙安排到这一帧的前面;然后从调度器 1 中取出时间范围在本帧中的传输机会安排到帧中;之后分配值为 R 的带宽给调度器 2 进行调度,若有连接中断的流,就将该流的带宽分配给别的连接,并在中断恢复连接后,按照信道的繁忙程度分配相应的带宽给调度器 2,并且调度器 2 执行相应的补偿策略;再分配值为 r_i 的带宽给调度器 3;最后到调度器 4 中取出 BE 业务的传输机会安排到帧中。

该调度架构具有以下几个优点:(1)保证了 UGS、rtPS 业务流的实时性。(2)保证了各个 nrtPS 业务流的预约带宽。(3)灵活有效地解决了无线信道特殊性带来的调度问题。(4)兼顾了 BE 业务流的带宽请求。因此,本节提出的 802.16MAC 层 QoS 调度架构是一种较好的、有效的调度架构。

第五章 IEEE802.16MAC 层调度的性能仿真分析

5.1 仿真工具介绍

通信技术的发展日新月异。目前,通信网络的仿真、智能化规划、优化以及管理成为通信领域的热点问题。而 OPNET 这一网络工具为解决通信网络(包括固定网、移动网络和卫星网络)仿真和优化以及网络高效的管理提供了整套解决方案,成为当前网络仿真以及分析领域出类拔萃的软件^[34]。

OPNET 公司起源于 MIT(麻省理工学院),成立于 1986 年。OPNET 公司最初只有一种产品 OPNET Modeler,到目前为止已经拥有 Modeler、ITGuru、SPGuru、WDMGuru、ODK 等一系列产品,客户群也从最初的美国军方扩展到通信的方方面面。OPNET Modeler 是当前业界领先的网络技术开发环境,以其无与伦比的灵活性应用于设计和研究通信网络、设备、协议和应用。Modeler 为开发人员提供了建模、仿真以及分析的集成环境,大大减轻了编程以及数据分析的工作量。Modeler 被世界各大公司和组织用来加速研发过程,开发大型的网路。本论文中 IEEE802.16MAC 层调度性能仿真采用的仿真工具就是 OPNET Modeler。

对于 OPNET Modeler,可以从三个层次进行概括和描述:(1)三层建模机制,OPNET Modeler 提供了网络层、节点层、进程层的三层建模机制,使得建模更加有条理,大大加快了研发速度;(2)事件驱动的仿真,对于离散时间仿真软件来说,事件驱动是一个很重要的概念,仿真时间的推动是靠事件来驱动的,有事件的时候则进行处理,没有事件的时候则推进仿真时间线;(3)基于包的通信,OPNET Modeler 中一个最重要的实体就是包,通过包的字段来体现通信协议,OPNET Modeler 一大部分的通信是靠包以及包中承载的信息来完成的。这三个层次是使用 OPNET Modeler 来进行通信系统建模的核心概念。

OPNET Modeler 几乎可以完成现有各种通信系统的仿真,包括核心网、接入网、无线网络、卫星网络以及各种混合型网络等。下面将详细介绍用 OPNET Modeler 进行 IEEE802.16MAC 层调度的性能仿真情况。

5.2 仿真模型建立

我们仿真的是 IEEE802.16 中基站的 MAC 层调度,假设它对应的用户站需要发送的各种业务的参数如表 5.1 所示,经过基站的调度后,各个业务流均能够得到他们所需要的带宽,保证 QoS 要求。

表 5.1 业务流的参数

业务类型	业务流	业务速率	调度策略	权重	总空中接口速率
实时业务	UGS	24kbps	EDF	无	4Mbps 上行2Mbps 下行2Mbps 帧长10ms
	rtPS	240kbps			
	rtPS轮询	8kbps			
	nrtPS轮询	3.2kbps			
非实时业务	nrtPS0	200kbps	WF^2Q	1	
	nrtPS1	200kbps		1	
	nrtPS2	200kbps		1	
	nrtPS3	400kbps		2	
尽力而为	BE	200kbps	WF^2Q	优先级	

基站的节点模型如图 5.1 所示, 其中 UGS 模块、NRTPS_POLL 模块、RTPS&POLL 模块分别产生的是 UGS 业务流传输机会、nrtPS-Polling 传输机会、rtPS 业务流和 rtPS-Polling 传输机会, 他们的实时性要求都很高, 所以采用 EDF 准则调度, 图中 q_0 模块就负责调度这些业务流。NrtPS0 模块、nrtPS1 模块、nrtPS2 模块、nrtPS3 模块分别产生的是 NrtPS0 业务流传输机会、nrtPS1 业务流传输机会、nrtPS2 业务流传输机会、nrtPS3 业务流传输机会。对这些业务流采用 WF^2Q 算法调度, 图中 q_1 模块就负责调度这些业务流。BE 模块产生的是 BE 业务流传输机会, 图中 q_3 模块负责调度 BE 业务流。Interrupt 模块用来模拟在一段时间内 nrtPS3 业务的链路产生中断, q_2 模块负责业务流链路发生中断后的调度, 最后 SCHEDULING 模块表示总的调度器, 用来产生 MAP 信息。其中 flag 模块给 rtPS 业务流数据包加上服务开始时间标签和服务完成时间标签, choose_finish 模块按照 SEFF 准则选择数据包传送到 q_1 模块准备进行调度。

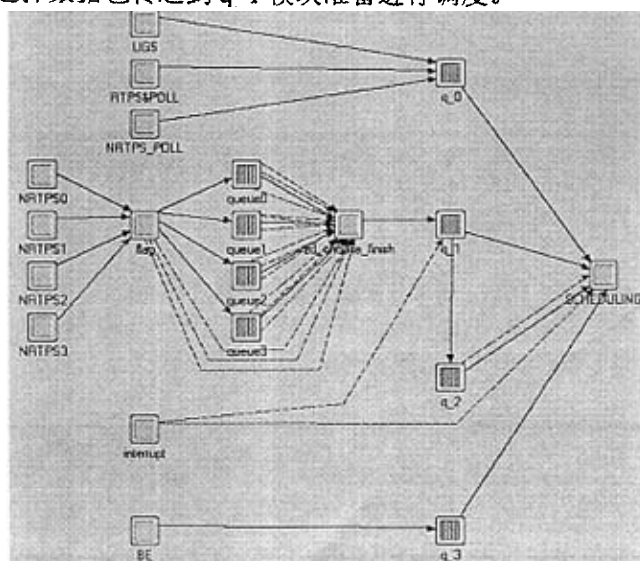


图 5.1 基站节点模型

对于 UGS 业务流,我们设定的是包到达间隔为 0.02 秒,包大小为 480bit; nrtPS-Polling 和 rPS-Polling 设定的是包到达间隔为 0.05 秒和 0.02 秒,包大小为 160bit; rPS 业务流设定的是包到达间隔为 0.02 秒,包大小为 4800bit; nrtPS0、nrtPS1、nrtPS2 业务流设定的是包到达间隔为指数分布, $\lambda=0.01$ 秒,包大小为均匀分布(250, 3750)bit; nrtPS3 业务流设定的是包到达间隔为指数分布, $\lambda=0.01$ 秒,包大小为均匀分布(500, 7500)bit; BE 业务流设定的是包到达间隔为指数分布, $\lambda=0.01$ 秒,包大小为均匀分布(250, 3750)bit。这些业务参数的设定如图 5.2 所示:

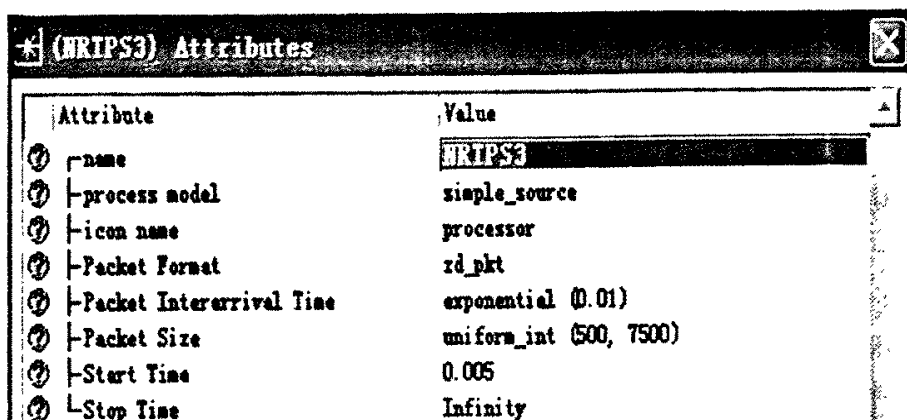


图 5.2 nrtPS3 业务流的参数设定

我们设定的仿真时间是 60 秒,其中 nrtPS3 业务流链路中断时间范围为 (14s,17s),Interrupt 模块进程模型中的部分编码如图 5.3 所示。

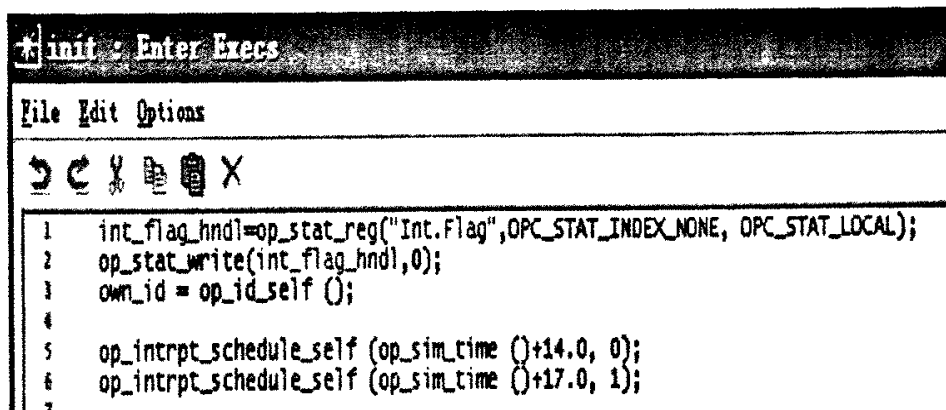


图 5.3 Interrupt 进程模型的部分编码

调度器 q_1 的进程模型如图 5.4 所示: 其中状态 arrival 和状态 service 分别表示有包到达和选择一个包发送的情形。

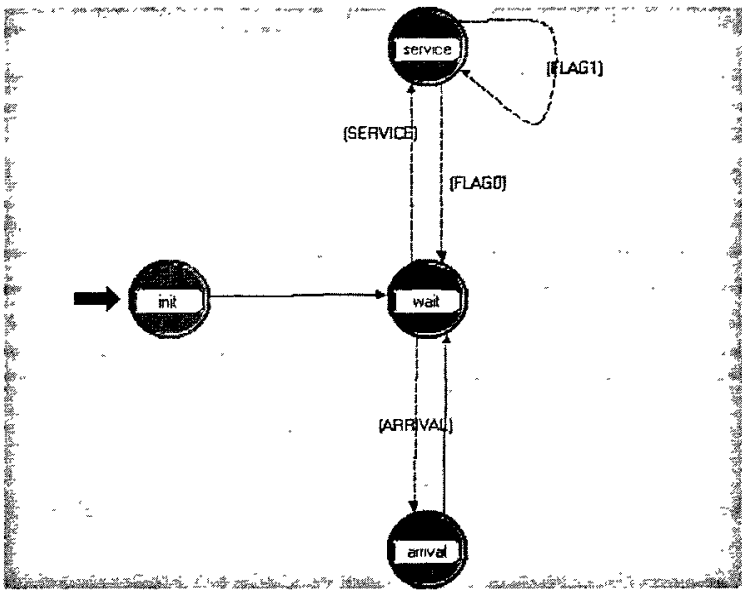


图 5.4 调度器 q₁ 进程模型

SCHEDULING 模块的进程模型如图 5.5 所示。进入初始状态后，是一个帧的状态转换控制器，该控制器负责上行帧和下行帧的转换。在上行帧的状态上还可以转换到另外两个状态。其中 NO_INTERRUPT 状态表示的是总调度器不用调度调度器 q₂ 中数据包的情形，YES_INTERRUPT 状态表示的是总调度器需要调度调度器 q₂ 中数据包的情形，当调度器 q₂ 中的数据包调度完毕后，YES_INTERRUPT 状态会转到 NO_INTERRUPT 状态中来。

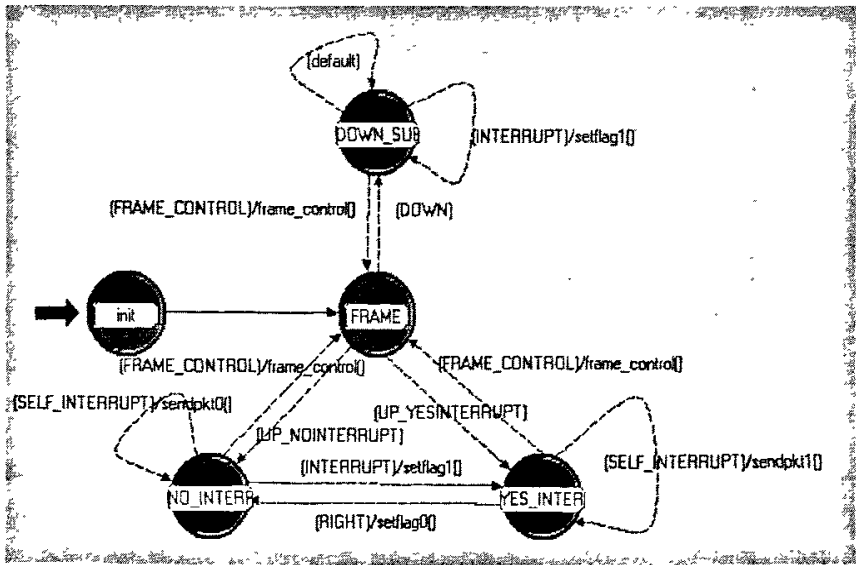


图 5.5 SCHEDULING 模块的进程模型

5.3 仿真结果分析

5.3.1 QoS 调度架构下的仿真分析

对于不同的类型的业务我们关心的具体参数也不同,下面将详细分析采用前面提出的 IEEE802.16MAC 层 QoS 调度架构后的仿真结果,后面将和其他调度架构下的仿真结果进行对比,说明了采用无线 WF²Q 算法后给系统带来的好处。

首先来分析一下三种类型的业务经过调度后所获得的带宽的情况,从图 5.6 中可以看出, nrtPS 业务的总的速率是 1000kbit/s 左右, nrtPS 业务流的带宽要求得到了保证;而 UGS、rtPS、rtPS-Polling、nrtPS-Polling 业务流的总的带宽要求是 275.2kbit/s,从图中我们可以看到这些实时业务流的带宽要求也得到了保证; BE 业务流的带宽要求是 200kbit/s,它的带宽要求也得到了保证。所以,从业务吞吐量这个方面来说该调度架构能很好地实现调度功能。

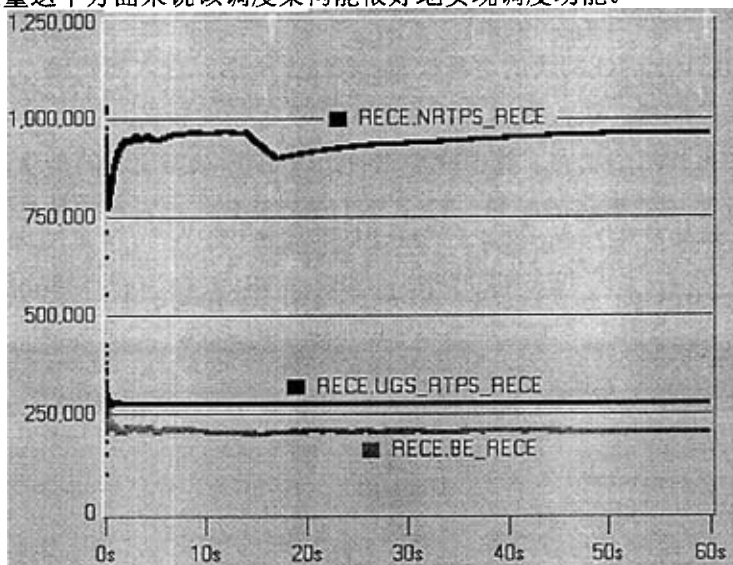


图 5.6 QoS 调度架构下的吞吐量

各种业务流总的带宽得到了保证,那么我们再来分析 WF²Q 算法有没有在同一类型的业务之间起作用,也就是有没有对 nrtPS 的不同业务流给予不同的带宽保证,我们设定的 nrtPS0、nrtPS1、nrtPS2 业务流的带宽要求是 200kbit/s, nrtPS3 业务流的带宽要求是 400kbit/s,所以该调度架构应该能保证每个业务流都能获得他们所要求的带宽。图 5.7 表示的就是 nrtPS 业务流之间的业务速率,我们可以明显看到这四个 nrtPS 业务流的带宽要求都能得到很好的保证。

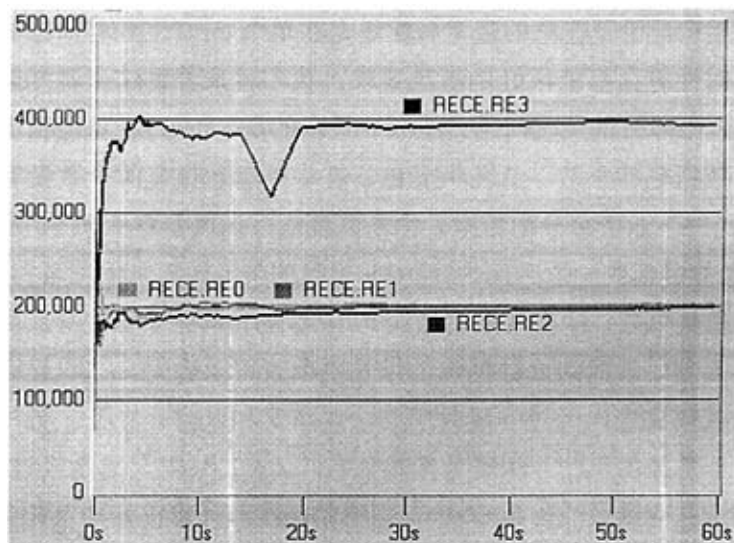
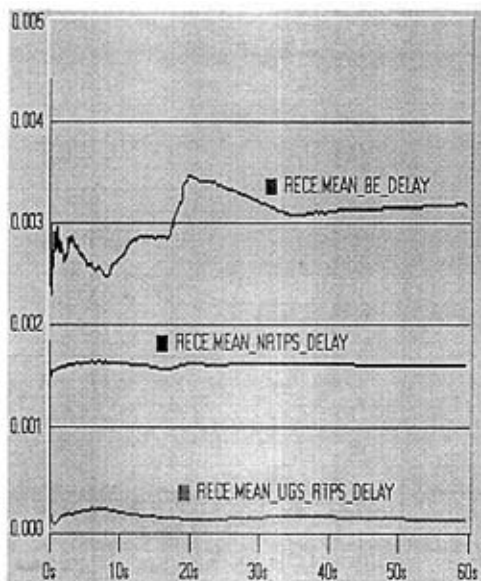
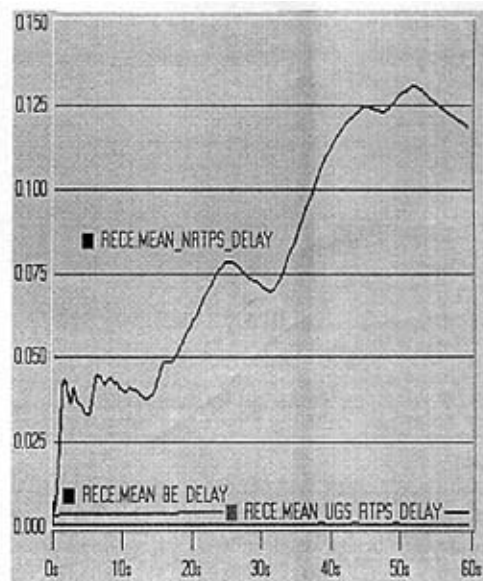


图 5.7 QoS 调度架构下 nrtPS 业务流的速率

我们再来看看该调度架构能否保证实时业务流的实时性要求, 图 5.8 表示的就是不同情况下各类型业务流的平均时延情况。图 5.8(a)是 nrtPS 业务流到达间隔为固定值 0.01 秒并且包大小固定的情形, 这时可以看到 UGS 等实时业务流的平均时延几乎为 0。图 5.8(b)是 nrtPS 业务流到达间隔为指数分布的情况, 这时可以看到虽然 nrtPS 业务流的时延由于到达间隔的影响而变得不稳定, 但 UGS 等实时业务流的时延仍然几乎为 0。可以看出, 该调度架构无论在何种情况下都能保证实时业务流的实时性要求。



(a) nrtPS 流到达间隔和包大小为固定值



(b) nrtPS 业务流到达间隔为指数分布

图 5.8 不同情况下各类型业务流的平均时延

该调度架构无论是在总的带宽分配还是在单个 nrtPS 业务流的分配或是实时业务流的实时性方面都能很好地满足要求,我们再来看看这个调度架构能否解决通信链路出现故障时的调度问题。图 5.9 显示的是 nrtPS3 业务流在链路发生中断前后发送的数据包的个数。从图中看出,在中断后数据包的个数没有变化,调度器不再给 nrtPS3 业务流分配带宽。中断恢复后,调度器对 nrtPS3 业务流进行带宽补偿,中断恢复后的一段时间内,nrtPS 得到的带宽比正常情况下得到的带宽多,等到带宽补偿结束后,调度器还是按照 nrtPS3 的预约带宽给它分配带宽。这从图中中断恢复后的一段时间内数据包的增长斜率就可以看出,它明显比链路正常时数据包的增长斜率大,经过一段时间后,斜率又和以前一样了。另外,我们设定的是 nrtP3 业务流的包到达间隔为指数分布, $\lambda=0.01$ 秒,那么经过 30 秒后调度器调度的数据包应该大约为 3000 个,图中的情况和计算正好一致,说明该调度架构在链路出现中断的情况下仍能保证业务流的带宽,它能很好地进行无线链路下的 QoS 调度。

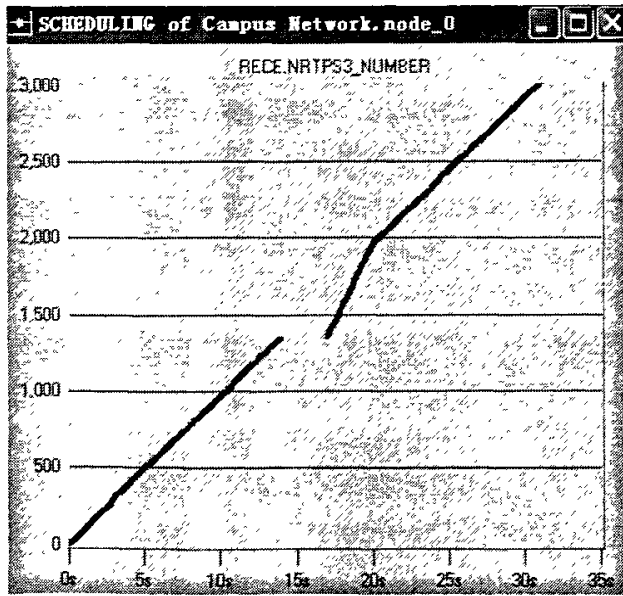


图 5.9 QoS 调度架构下 nrtPS3 流发送的数据包的个数

5.3.2 与其他调度架构的仿真比较

上一节仿真是对采用第四章提出的 IEEE802.16MAC 层 QoS 调度架构后性能的仿真。但是相比于其他的调度架构,该调度架构到底好在什么地方?采用该 QoS 调度架构的好处主要有三点:第一,保证了有不同预约带宽的 nrtPS 业务流可以获得与其权重成比例的服务机会。第二,当系统出现一个恶意流(没有适当的流控而不断地吞噬带宽的流)时,保护其他的流能预约到一定的带宽。这种保护体现在两

个方面,一方面是对 nrtPS 业务流的保护,另一方面是对 BE 业务流的保护。第三,能够进行无线环境下的带宽补偿。

BE 业务并不是一种可以任意损害的流,不能以无限制地挤占 BE 的带宽为代价来增加 nrtPS 业务流的传输带宽,因为虽然 BE 不繁忙,而且没有时延要求,但如果为了能够使得 nrtPS 业务流传输得更快而去让 BE 流无限制地等待,这样的系统显然是不合理的。因此,BE 业务流应该理解为在能保证其他业务的需求的前提下,尽可能好地为其提供服务的流。因此通过无线 WF²Q 算法对 nrtPS 业务流进行总带宽的限制对 BE 业务流是很有积极意义的。

我们主要与两种调度架构进行仿真对比,一是不采用无线 WF²Q 算法的调度架构,我们称为简单调度架构,另外一个采用无线 WFQ 算法的调度架构,我们称为 WFQ 调度架构。通过与这两种架构的比较,我们可以看出前面提出的 QoS 调度架构的优越性。

1) 与简单调度架构的比较

简单调度架构的节点模型如图 5.10 所示,这个调度架构仅仅按照 FIFO 准则来调度数据包,不同类型的业务按照 UGS 等实时业务流优先,其次为 nrtPS 流,最后为 BE 业务的原则。我们假设业务流的参数除了 nrtPS 业务流中的 nrtPS0 和以前不一样以外,其他的都一样。

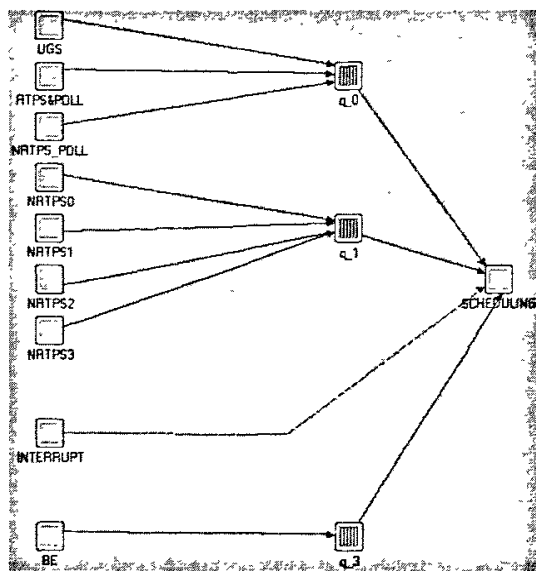


图 5.10 简单调度架构节点模型

在这个调度架构中,设定 nrtPS0 的包大小和以前一样,包到达间隔仍然是指数分布,只不过 $\lambda = 0.002$ 秒,因此它的到达速率是 1000kbit/s,是以前的 5 倍,但是它实际预约的速率仍然为 200kbit/s。对于这样的恶意流,我们来看看不同类型业务的总的服务速率在简单调度架构下和 QoS 调度架构有什么不同。仿真结果

如图 5.11 和图 5.12 所示。从图中可以看出,简单调度架构不能对恶意流所占用的带宽进行限制。而且 BE 业务流的带宽被严重挤占了,它获得的带宽几乎为 0。这说明简单调度架构下带宽分配处于失控状态。而采用无线 WF²Q 算法的 QoS 调度架构将 nrtPS 业务流的带宽严格限制在 1000kbps 左右,并且各个 nrtPS 业务流的服务速率也严格限制为他们的预约速率。

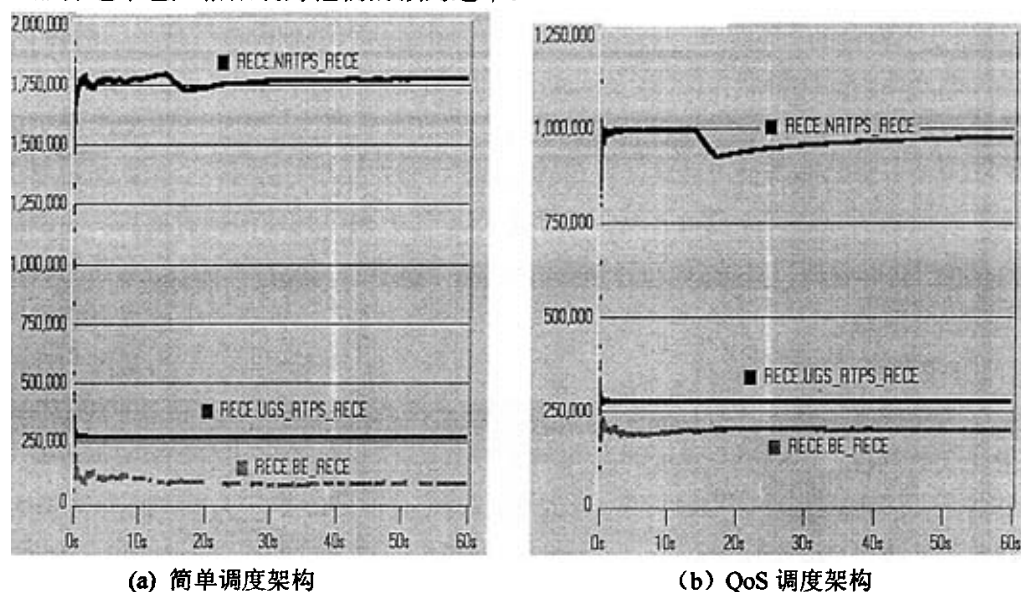


图 5.11 有恶意流时与简单调度架构的吞吐量对比

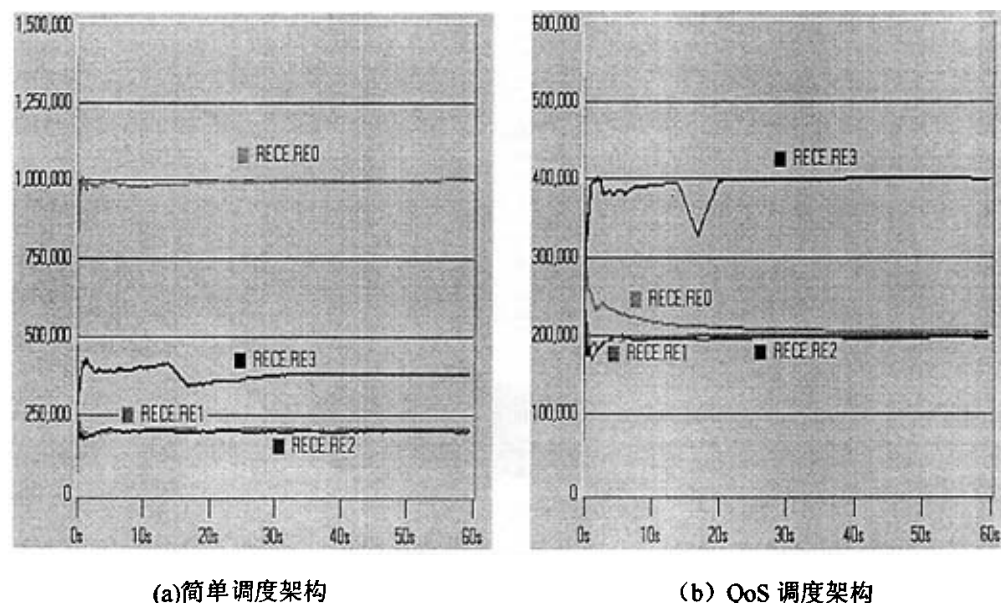


图 5.12 有恶意流时与简单调度架构 nrtPS 流服务速率的对比

再看看简单调度架构在链路出现故障时的情况。从图 5.13 中可以看出,

nrtPS3 业务流发送数据包个数的增长斜率在链路中断前后并无变化，再根据计算到 30 秒的时候应该发送的包的个数约为 3000 个，而从图中看出采用简单调度架构到 30 秒的时候发送的包的个数仅为 2700 个左右，因此说明简单调度架构并不能进行带宽补偿。

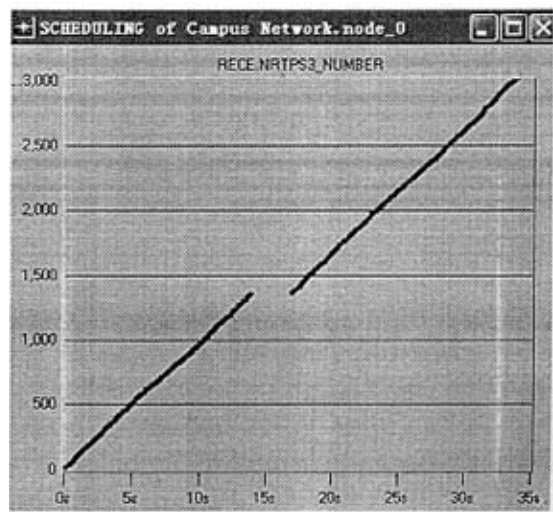


图 5.13 简单调度架构下 nrtPS3 流发送数据包个数

2) 与 WFQ 调度架构的仿真比较

WFQ 调度架构的节点模型如图 5.14 所示，这个调度架构和采用无线 WF²Q 算法的 QoS 调度架构基本上是一样的，唯一不同的就是调度器 q₁ 改为使用 WFQ 算法。我们来看看分别使用这两种算法有什么不同。

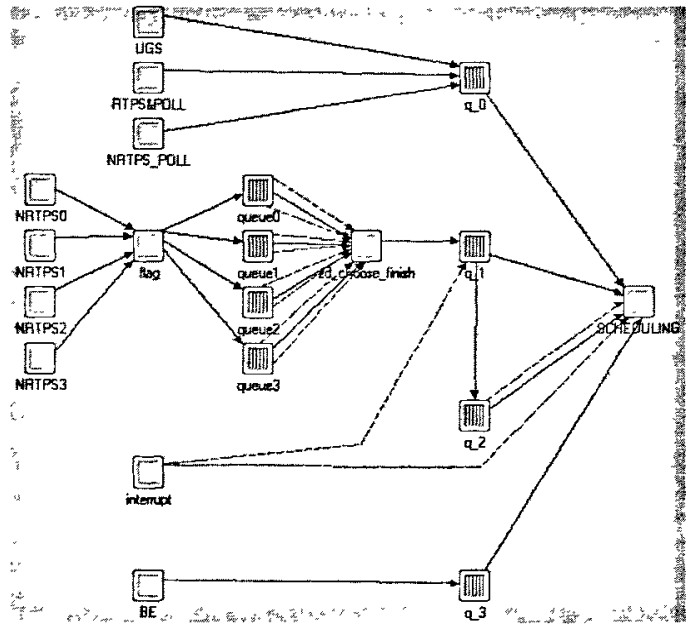


图 5.14 WFQ 调度架构节点模型

我们先来看看业务流参数和以前一样的情况，也就是正常情况，没有恶意流的情形。如图 5.15 和图 5.16 所示。可以看出，在没有恶意流的情况下，采用无线 WFQ 算法的 WFQ 调度架构和采用无线 WF²Q 算法的 QoS 调度架构没有什么太大的差别，两种架构的性能是差不多的。

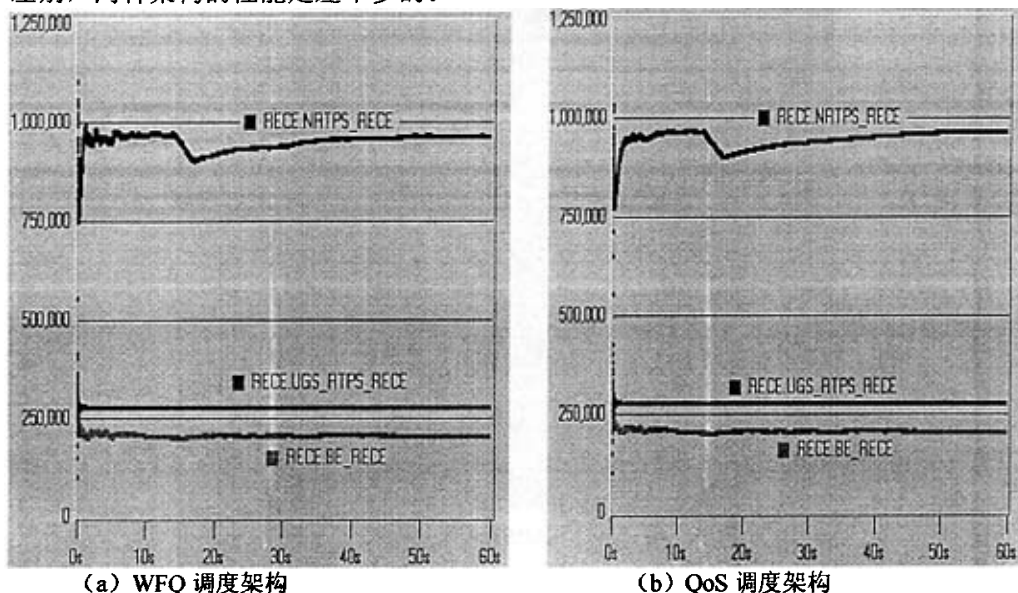


图 5.15 无恶意流时与 WFQ 调度架构的吞吐量对比

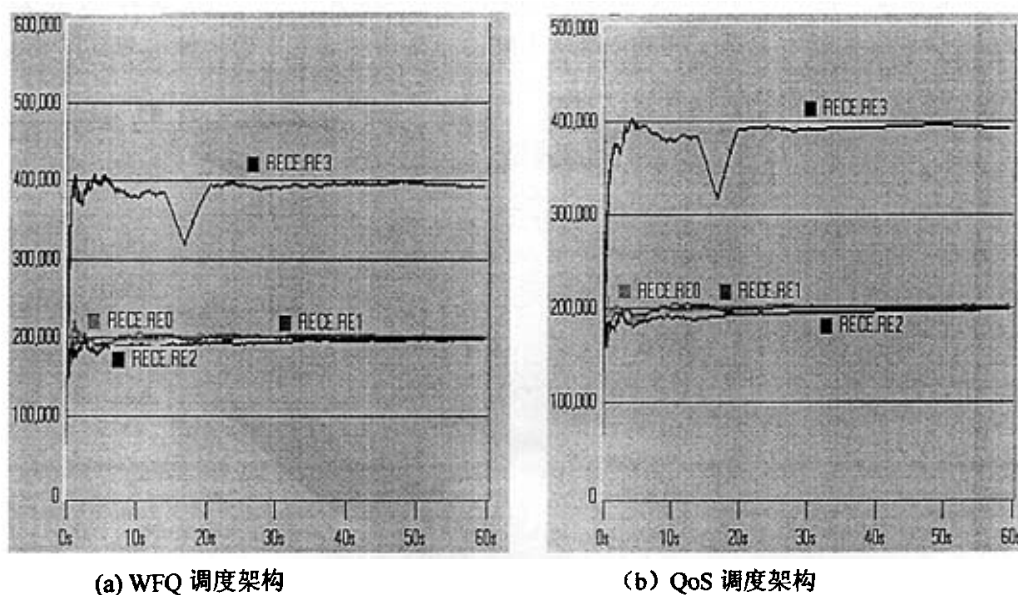


图 5.16 无恶意流时与 WFQ 调度架构 nrtPS 流服务速率的对比

我们再来看看有恶意流的情况下两种调度架构有什么区别。仍然将 nrtPS0 业务流的包到达间隔设为指数分布， $\lambda = 0.002$ 秒。如图 5.17 和图 5.18 所示，我们

发现采用 WFQ 算法虽然能够将 nrtPS 业务流总的服务速率限制在 1000kbps 左右,但是并不能将每个 nrtPS 业务流的服务速率严格限制为他们的预约速率,他们的带宽还是受到了一些挤占。也就是说 WFQ 调度架构只能起到一部分流控作用,它虽然能保护到 BE 业务流的带宽不受挤占,但是并不能像 WF²Q 算法那样精确地控制好每个 nrtPS 业务流的带宽。在第三章我们就得到了 WF²Q 算法比 WFQ 算法更精确,更接近于 GPS 算法的结论,这里的仿真结果和这个结论是一致的。

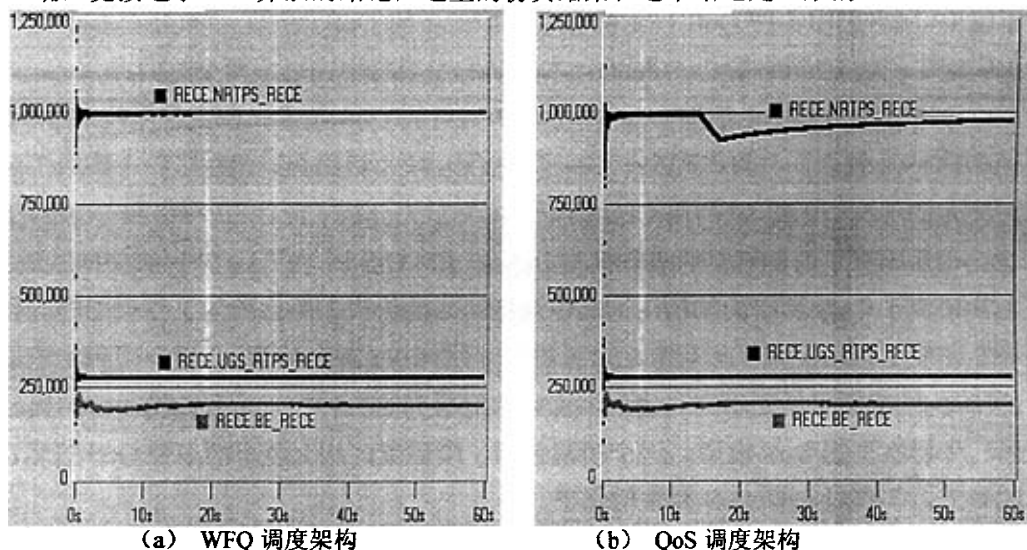


图 5.17 有恶意流时与 WFQ 调度架构的吞吐量对比

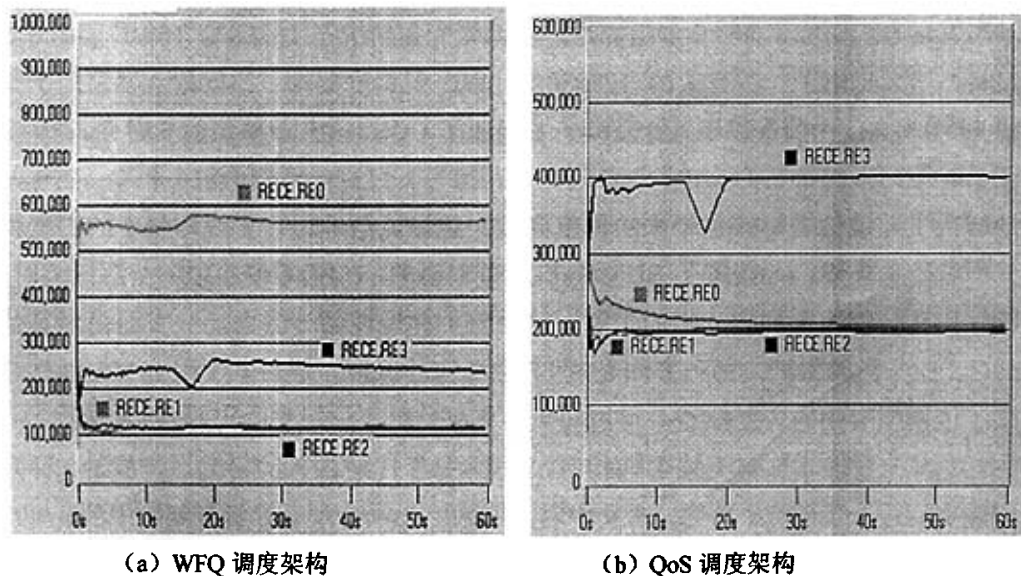


图 5.18 有恶意流时与 WFQ 调度架构 nrtPS 流服务速率的对比

从上面的性能仿真分析我们可以看出,采用无线 WF²Q 算法的 IEEE802.16MAC 层 QoS 调度架构的确能很好地应用于 802.16 中的 MAC 层调度。

第六章 结论

无线 IP 网络融合了无线通信技术和 IP 网络技术,是新一代无线网络的发展趋势。随着无线网络的发展,无线 IP 网络还必须能够提供各种数据传输业务,包括语音业务、视频业务等。这些不同的应用分别有不同的服务质量要求,这就要求无线 IP 网络采用各种 QoS 技术来保证这些业务的 QoS 要求。本文正是基于这一点研究了无线 IP 网络的 QoS 技术。本文研究主要集中在以下两个方面:

一方面是从总体上把握,结合有线 IP 网络的 QoS 技术,研究了无线 IP 网络的多种 QoS 技术。并将多层次、多平面的 QoS 技术相结合,建立了一个集成了多种技术的层次型无线 IP 网络 QoS 模型。本文首先分析了无线 IP 网络和 QoS 的概念;稍后研究了两种重要的服务模型 IntServ 和 DiffServ 在无线 IP 网络中的改进;其次研究了 QoS 网络的结构,这其中包括网络的组成和路由器的工作原理等,并着重研究了接纳控制;然后本文对无线 IP 网络中的 TCP 协议、MAC 层和物理层的 QoS 技术做了简要研究;最后本文将前面研究的各种技术进行归纳,总结提出了一个层次型的 QoS 模型。这个模型包括了端到端、从上至下的多种 QoS 技术,能有效地实现对业务 QoS 要求的保证。

另一个方面是从细节上把握,着重研究了无线接入网中的 IEEE802.16 协议的 QoS 技术。因为后面提出的 IEEE802.16MAC 层调度架构中要采用 WF^2Q 算法,所以第三章专门研究了 WF^2Q 调度算法。第四章先是研究了 IEEE802.16MAC 层的 QoS 策略,然后提出了一种有效的 IEEE802.16MAC 层调度架构。该架构主要采用了无线 WF^2Q 算法,主要有以下几个优点:(1)保证了 UGS、rtPS 业务流的实时性。(2)保证了有不同预约带宽的 nrtPS 业务流可以获得与其权重成比例的服务机会。(3)有效地解决了无线信道特殊性带来的调度问题,能够灵活地进行无线环境下的带宽再分配和带宽补偿。(4)兼顾了 BE 业务流的带宽请求。(5)当系统出现一个恶意流时,能保护其他的流预约到一定的带宽。这种保护体现在两个方面,一方面是对其他 nrtPS 业务流的保护,另一方面是对 BE 业务流的保护。最后本文用 OPNET 软件建立了该调度架构的调度模型,通过实际仿真来检验了该模型的可行性和正确性。

总体来说,本文对无线 IP 网络 QoS 技术做了比较深入的研究,但是还有许多问题有待进一步研究。首先,本文中对 IEEE802.16MAC 层 QoS 调度架构中的 nrtPS 业务流的轮询间隔未做深入研究,下一步可以研究根据网络的情况对 nrtPS 业务流轮询间隔进行控制的方法,从而进一步提高网络的效率。其次本文还可以对链路中断恢复后信道繁忙的情况继续进行仿真分析。另外 WF^2Q 算法虚时间函数的计算太复杂,运算量太大,下一步可以研究采用 WF^2Q+ 等算法来解决这个问题。

致 谢

首先要衷心感谢的是我的导师—刘乃安教授，感谢他两年半来给予我学习和生活上的关心和指导。刘老师丰富的工程经验、严谨的学术风范、平易近人的作风对我的学习以及这篇论文的完成具有很大的影响。相信这将成为我今后学习、生活和工作中的宝贵财富。

另外一个需要特别感谢的是我的远在异地的男友，一方面他教给了很多做学问的方法，总是在我论文工作停滞不前的时候帮我认真地分析解决问题；另一方面他在生活上也给了我无微不至的关怀和帮助。还要感谢我的家人多年来给予我的真挚的关怀和鼓励。正是他们对我深深的爱和期望使我有勇气完成论文的力量。

感谢我的室友李萱、王晓燕、张娜的帮助及鼓励，感谢他们伴我度过两年半的研究生时光。感谢我的同门张南等同学，在平时与他们的学术探讨中，我得到许多有益的思想，这对我的论文产生了一定的指导意义。

最后，向百忙中抽出时间来评审论文和参加答辩的老师表示深深的感谢！

参考文献

- [1] 李建东, 盛敏, 刘乃安. 宽带无线 IP 技术与系统[J]. 中兴通信技术, 2002 年第 1 期, 页码: 45—48
- [2] Braden, R., Clark, D. and S. Shenker. Integrated Services in the Internet Architecture: An Overview. RFC1633, July 1994.
- [3] Blake, S., Black, D., Carlson, M., Davies, E., Wang, Z. and W. Weiss. An Architecture for Differentiated Services. RFC 2475, December 1998.
- [4] RFC 2205 Resource Reservation Protocol (RSVP) -- Version 1
- [5] Wei Wu, Wen—Shiung Chen and Ho—En Liao etc. A Seamless handoff approach of mobile ip protocol for mobile wireless data networks. IEEE transactions on Consumer Electronics, May 2002, 48(2): 335-344
- [6] Janusz Gozdecki, Andrezej Jajszczyk and Rafal Stankiewicz etc. Quality of Service Terminology in IP networks. IEEE Communications Magazine, March 2003, 41(3): 153—159
- [7] Emmanuel Marilly, Olivier Martinot and Hélène Papini etc. Service level agreement: A main challenge for next generation networks. ECUMN, April 2002: 297-304
- [8] 何宝宏, 矾山和彦, 齐藤博辛等. IP QoS 控制技术[J]. 电信网技术, 2002 年 4 月第 2 期, 页码: 7—12
- [9] 赵佳玉, 鲍慧. IP 网络的 QoS 实现技术[J]. 电力系统通信, 2004 年第 12 期, 页码: 20—22
- [10] Bin Wu, Geng-Sheng Kuo. A probabilistically adaptive resource reservation scheme in future wireless multimedia-oriented IP networks. Vehicular Technology Conference, Sept 2004, Volume 5: 3476-3480
- [11] Andreas Terzis, Mani Srivastava and Lixia Zhang. A Simple QoS Signaling Protocol for Mobile Hosts in the Integrated Services Internet. IEEE Societies Proceedings, March 1999, Volume 3: 1011-1018
- [12] Chien-Chao Tseng, Gwo-Chuan Lee and Ren-Shiou Liu. HMRSVP: A Hierarchical Mobile RSVP Protocol. 2001 international conference, April 2001: 467-472
- [13] Jui-Tang Wang, Jen-Shun Yang and Chien-Chao Tseng. An intelligent agent-based mobile resource reservation scheme. Parallel and Distributed Systems, Proceeding, 11th International Conference, July 2005, Volume 1: 737-742

- [14] YE Min-hua,ZHANG Ying and ZHANG hui-min. A modified HMRSVP scheme. Vehicular Technology Conference, April 2003, volume 4:2779-2782
- [15] Gwo-Chuan Lee, Tsan-Pin Wang and Chien-chao Tseng. Resource Reservation with Pointer Forwarding Schemes for the Mobile RSVP. IEEE Communications Letters, July 2001, 5(7):298-300
- [16] 杨帆, 朱光喜. 宽带无线 IP 系统中基于区分服务的 QoS 实现策略[J]. 通信技术, 2002 年第 9 期, 页码: 73—75
- [17] Werner Almesberger, Silvia Giordano and Roberto Mameli. A Prototype implementation for the IntServ operation over DiffServ Networks. IEEE Global Telecommunications Conference, Dec 2000, volume 1:439-444
- [18] 户田 岩, 朱青, 卓力等. 网络服务质量技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003 年, 页码: 30
- [19] Baoxian zhang, Mouftah, H.T. QoS routing for wireless ad hoc networks: problems, algorithms, and protocols. IEEE Communications Magazine, Oct 2005, 43(10): 110-117
- [20] Perros, H.G and Elsayed. Call admission control schemes: a review. Communications Magazine. Nov 1996, 34(11): 82-91
- [21] Swarstik Kopparty, Srikanth V. Krishnamurthy and Michalis Faloutsos etc. Split TCP for Mobile Ad Hoc networks. IEEE GLBECOM, Nov 2002, volume 1:138-142
- [22] IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications
- [23] Golestani, S.J. A self-clocked fair queueing scheme for broadband applications. INFOCOM, 13th Proceedings IEEE, June 1994, volume 2: 636—646
- [24] Stiliadis, D, Varma .A. Efficient fair queueing algorithms for packet-switched networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, April 1998, 6(2):175-185
- [25] Parekh, A.K. a generalized processor sharing approach to flow control in integrated services networks: the single-node case. IEEE/ACM Transactions on networking, June 1993, 1(3):344-357
- [26] 邬海涛, 王重刚, 隆克平等. 一种新的基于 GPS 的分组公平调度器[J]. 电子学报, 2002 年 4 月第 4 期, 页码: 460—463
- [27] 齐望东, 彭来献, 董民. WFQ 不是 PGPS 吗? ——对“一种新的基于 GPS 的分组调度器”一文的评注[J]. 电子学报, 2003 年 12 月第 12 期, 页码: 1889—1890

- [28] Jon C.R.Bennett,Hui Zhang. WF^2Q :Worst-case Fair Weighted Fair Queueing. INFOCUM'96,IEEE Proceedings,March 1996,volume 1:120-128
- [29] Draft IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16:Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems
- [30] 李茗, 彭木根, 王文博. WiMAX 系统 QoS 机制研究[J]. 现代电信科技, 2005 年 7 月第 7 期, 页码: 25—30
- [31] Kitti Wongthavarawat, Aura Ganz. IEEE 802.16 based last mile broadband wireless military networks with quality of service support.IEEE MILCOM,Oct 2003,volume 2:779-784
- [32] Dimitrios Stiliadis, Anujan Varma. Efficient Fair Queueing Algorithms for Packet —Switched Networks. IEEE/ACM Transactions on networking, April 1998,6(2): 175-178
- [33] GuoSong Chu,Deng Wang,Shunliang Mei. A QoS Architecture for the MAC Protocol of IEEE802.16 BWA System. IEEE international Conference,July 2002, volume 1:435-439
- [34] 王文博, 张金文. Opnet Modeler 与网络仿真[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003 年, 页码: 63—248
- [35] Quality of service scheduling in cable and broadband wireless access systems
- [36] 宋舰, 李乐民. 一种按比例补偿的无线公平调度算法[J]. 电子与信息学报, 2004 年 5 月, 26(5): 777—782

在读期间的研究成果

- [1] 张丹, 刘乃安. 一种有效的 802.16 MAC 层 QoS 调度架构[J]. 电信快报, 2005 年 8 月第 8 期, 页码: 35—37