

ITS 无线接入网业务建模和调度方法设计

陶桦¹ 王霄峻² 戴海阔²

(东南大学网络与信息中心 南京 210096)¹

(东南大学信息科学与工程学院 移动通信国家重点实验室 南京 210096)²

摘要 首先介绍了面向智能交通系统(Intelligent Transportation System,ITS)的无线接入网网络结构和主要业务,对车路协同业务和PTT语音业务进行了分析和建模。然后根据不同业务的特点及QoS需求提出具有针对性的调度方案:对于车路协同业务,采用适应车速的动态调度方法;对于PTT语音业务,采用基于状态转换的调度方法;对于视频和其他对时延不敏感的数据业务,采用缓存请求的调度方式。最后在OPNET平台上对调度方法进行仿真,针对各种ITS业务得出延时、丢包率等性能曲线,验证了算法的有效性,这也为ITS接入网的网络设计提供了参考。

关键词 智能交通系统(ITS),接入网,QoS,调度方法,OPNET

中图分类号 TP393 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.11.036

Services Modeling and Scheduling for Wireless Access Network Oriented Intelligent Transportation System

TAO Hua¹ WANG Xiao-jun² DAI Hai-kuo²

(Network and Information Center, Southeast University, Nanjing 210096, China)¹

(School of Information Science and Engineering, National Mobile Communication Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)²

Abstract This paper first described the architecture and the main services of the wireless network oriented ITS (Intelligent Transportation System). The services of Cooperative Vehicle-Infrastructure System and PTT voice were analyzed and modelled. Pointed scheduling schemes were proposed for different services according to their QoS requirements. For the service of Cooperative Vehicle-Infrastructure System, vehicle speed adapted dynamic scheduling is adopted. For the service of PTT voice, scheduling based on state transition is adopted. For the video and other services which are not sensitive to delay, scheduling request is generated based on buffer status. Finally, the scheduling schemes were simulated on OPNET, from which the availability was verified with performance curve of delay and packet loss rate. This also provides reference for ITS access network design.

Keywords Intelligent transportation system, Wireless access networks, QoS, Scheduling schemes, OPNET

智能交通系统^[1]将先进的信息技术如电子控制技术、数据通信技术以及计算机技术应用于车辆和道路的管理,以缓解交通拥挤,减少交通事故,改善环境质量和节约资源。其中,通信技术用于满足车辆、道路和管理中心等ITS要素之间及时交互信息的需求,在ITS中起着重要的作用。

本文所基于的ITS通信网络结构如图1所示^[2],其中用户终端(Subscriber Station,SS)分为固定终端和移动终端,固定终端包括报警电话、传感器和摄像头等,移动终端主要指车辆所安装的用于车路协同应用的车载单元、PTT(Push To Talk)语音终端和少量移动视频采集设备;基站(Base Station,BS)构成无线MESH网络,完成业务数据的转发及路由维护;接入点(Access Point,AP)为无线MESH网络与ITS骨干网间的网关设备。

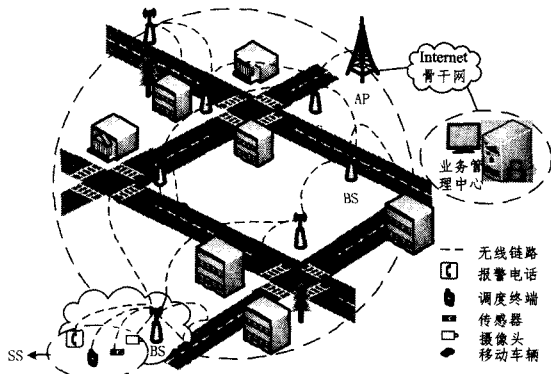


图1 ITS无线接入网络构成体系

SS节点通过无线方式接入到最合适的BS,多个SS与单个BS构成PMP(Point to Multi-Point)方式的无线接入网;BS通过无线自组织多跳通信的方式转发业务数据至目的节点;部分应用中的业务数据经由AP接入ITS核心网,实现与后台业务服务器的通信。

针对PMP接入网,IEEE面向智能交通专门制定了802.11p(又称Wireless Access in the Vehicular Environment, WAVE)MAC接入标准^[3],该协议主要用于车载电子无线通信,从IEEE 802.11扩充延伸以符合智能交通的相关应用。

到稿日期:2013-11-19 返修日期:2014-01-19 本文受国家科技重大专项(2010ZX03004-002-03),交通部科技项目(2012-364-222-203)资助。

陶桦(1976-),男,硕士,工程师,主要研究方向为计算机网络;王霄峻(1975-),男,博士,研究员,主要研究方向为移动通信和无线网络技术;戴海阔(1986-),硕士生,主要研究方向为无线通信网络。

应用的层面包括高速率的车辆之间以及车辆与 ITS 路边基础设施之间的数据交换。802.11p 已被美日欧等国众多 ITS 体系采纳。

802.11p 工作于 5.9GHz 的频谱,并由 7 个带宽为 10 MHz 的信道组成,如图 2 所示。其中 178 信道是控制信道(CCH),它只用于安全通信。两边的信道用来做特殊使用,其余的信道都是用于车载安全和非安全方面的服务信道信息。

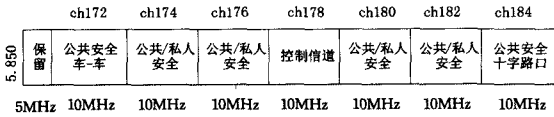


图 2 802.11p 频谱和信道分配

802.11p 的主要技术特征为:1)采用多信道机制保障安全业务的接入延时保障;2)基于 IEEE802.11e EDCA 进行修改,在进一步减小接入延时的同时,加快了认证关联的速度。802.11p 核心接入方法仍为 CSMA,且未考虑调度语音和监控图像的 QoS 要求,因此无法从本质上保障业务 QoS,多信道机制也增加了技术实现复杂性^[4]。

除 802.11p 外,部分厂商也尝试借助 LTE 移动通信管道为 ITS 传输业务,然而移动通信由于复杂的地面网络交换和控制,无法适应 ITS 的 PMP 网络快速的车辆信息交换要求。

基于此,本文在对典型的 ITS 业务进行建模分析的基础上,提出一种复杂度较低的 PMP 网络单信道动态调度方案,以适应各种 ITS 业务的 QoS 要求。

1 ITS 无线接入网业务分析

在 ITS 中,及时可靠的信息交流需要无线接入网提供具有 QoS 保障的业务传输。表 1 描述了 ITS 所承载的各种业务的业务种类和特性^[5]。

表 1 业务种类和特点

网络角度	终端角度	具体内容	业务特点
数据	传感器数据	公路气象数据采集(温度/湿度/风速/风向/能见度/雨雾冰雪雷电等) 路况信息采集(路面/路基/路边/立交/桥/隧等)	汇聚型、非连接、VBR、检错丢弃、周期采集
	交通消息	交通信息发布(对路上车辆或使用公路的一方)	广播型、非连接、VBR、检错重发
	图像数据	车辆数据信息采集(车流量/平均车速等)	汇聚型、非连接、检错重发
	设备数据	网络设备控制与状态信息	双向、非连接
视频	车辆状态数据	车辆运行状态信息(超速/超载/位置/车间位置/车况/醉驾/违规驾驶等)	汇聚型、广播型、事件突发型、VBR、检错重发、面向连接
	摄像头监控	公路气象数据监控(雨雾冰雪等) 路况、车流量数据监控 关键交通设施实时监控	汇聚型、面向连接、检错丢弃、业务传输时延
语音	应急报警		双向、面向连接、业务传输时延 < 100ms
	电话语音	PTT 语音调度	双向、非连接、VBR、业务传输时延 < 100ms, 业务接入时延 < 100ms

车辆状态数据,通过车路信息交互和共享,可实现车辆和基础设施之间智能协同与配合,达到优化利用系统资源、提高

道路交通安全、缓解交通拥堵的目标。车辆状态信息是 ITS 系统的核心业务,也称为车路协同业务。PTT 语音用于调度指挥,是另一种比较重要的业务,同其他语音一样,只有在端到端时延小于 0.1s 时,才不会被察觉到,因此 PTT 语音调度的重点是保证该业务的时延。视频业务的特点是业务量大,对时延有一定的要求。其他数据对时延并没有特殊要求。

1.1 ITS 车路协同业务分析和建模

车路协同业务在所有的业务中优先级最高,在设计调度算法时要优先保证该业务获得足够的资源。通常快速行驶的车辆的状态信息变化也较快,需要更高的业务上传频次,比如高速路上畅行的车辆;而对于缓慢变化的车路环境,例如严重拥堵的路况,只需要基本的业务频次,即可实现车路协同,同时又节约了宝贵的频谱资源。因此在调度中有必要对车路协同业务的业务量作出合理的估计,以此为该业务分配合适的资源,既保证到达的业务有效发送,又保证资源的利用率。

设基本参数 n 为 BS 覆盖范围内的车辆数,并设 n 的最大值为 N_{max} ,即在完全拥堵路况下的车辆数。在车辆数 n 很小时,车辆可以以最大速度 V_{max} 行驶,此时的路况称为畅行路况。

在 n 较小时,BS 内车辆的平均速度 μ 很大,随着 n 的增加 μ 开始减小,直至拥堵路况下 μ 降至 0。 n 和 μ 之间的关系可以由交通流理论来表示。

根据交通流理论^[6],车辆的平均速度 μ 与畅行速度 V_{max} 之间的关系满足:

$$\mu = V_{max} \left(1 - \frac{k}{k_{max}}\right) \quad (1)$$

式中, k 表示车流密度, k_{max} 表示阻塞车流密度,即 k 的最大值。

容易发现,在 BS 覆盖范围内有:

$$\frac{n}{N_{max}} = \frac{k}{k_{max}} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可以得到:

$$\mu = V_{max} \left(1 - \frac{n}{N_{max}}\right) \quad (3)$$

根据交通流理论,一定范围内所有车辆的车速分布满足正态分布,即车速 v 满足下面的速度分布函数。

$$f(v) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

其中, μ 是前面讨论到的平均车速, σ 为标准差。

根据前面的讨论,车路协同业务的频次 f 应该由车速确定,车速高则频次高,最高车速则有最高频次 F_{max} ,同样阻塞状态下的车辆则有最低的频次 F_{min} 。为简单起见,定义业务频次 f 和车速 v 为一次线性关系:

$$f = \frac{F_{max} - F_{min}}{V_{max}} v + F_{min} \quad (5)$$

由前面的讨论可知车路协同业务的业务量为:

$$s = n \int_0^{V_{max}} \left(\frac{F_{max} - F_{min}}{V_{max}} v + F_{min}\right) \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-\mu)^2}{2\sigma^2}} dv$$

由交通流理论可知, $\sigma \ll \mu$, 对上式计算可得:

$$s = n \left(F_{max} - \frac{F_{max} - F_{min}}{N_{max}} n\right) \quad (6)$$

从上面的结果可知,一般情况下业务量和车辆数是二次函数的关系,在 $n = \frac{F_{\max} N_{\max}}{2(F_{\max} - F_{\min})}$ 时取得最大值:

$$S_{\max} = \frac{F_{\max}^2 N_{\max}}{4(F_{\max} - F_{\min})} \quad (7)$$

并且,在 $n = \frac{F_{\max} N_{\max}}{2(F_{\max} - F_{\min})}$ 之前,业务量一直随着车辆的增加而增加,这是由于在车辆较少的情况下,车速比较快,业务频次高,因此产生的业务流越来越大;在 $n = \frac{F_{\max} N_{\max}}{2(F_{\max} - F_{\min})}$ 之后,随着车辆的增加,车辆的速度下降明显,每辆车的业务量减少,总的业务量也逐渐减少到一个固定值;在最后的饱和状态,每辆车的速度接近为 0,业务量也减少到最低值,此时总的业务量为 $s = F_{\min} N_{\max}$ 。

1.2 PTT 语音业务分析

PTT 是一种采用单工方式工作的一对一或一对多的通信。ITS 中引入 PTT 语音是因为 PTT 语音在交通调度指挥中可以发挥作用。PTT 语音业务的实现必须满足两个要求,首先是呼叫接入时间必须在 1 秒以内,否则会让人感到产生滞后的感觉;另一个方面是通话期间的时延保证。

PTT 语音主要有两种状态:激活态和静默态^[7]。两种状态交替出现,激活态产生固定间隔的语音业务分组,而静默态没有语音分组产生,代之以固定间隔时间更长的静音帧,如图 3 所示。

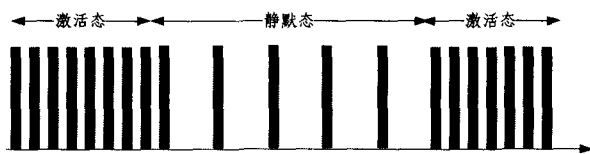


图 3 语音的量化分组表示

2 ITS 业务调度算法的研究

ITS 接入网的调度算法可以从上下行调度两方面来考虑:BS 可单独完成下行调度任务,只需要将调度结果通知各个 SS 即可。而上行调度的业务源在 SS,BS 需要根据 SS 的请求来安排调度,这样不仅复杂度更高,而且由于有管理消息的参与,资源需求也更多,因此调度模型关注的重点是 BS 和 SS 之间如何协作完成业务的调度。

参考文献[8]中的调度模型,设计的 ITS 接入网络上下行调度模型如图 4 所示。

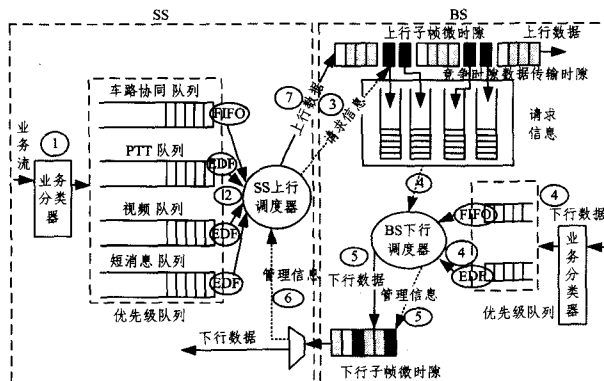


图 4 ITS 网络 QoS 框架的上下行调度模型

在上行调度中,到达 SS MAC 层的业务量通过分类器

进行分类处理。不同的 SS 终端包含的业务种类可能不一样,例如车辆终端不具备视频业务功能。分类后业务流进入各自的缓冲区队列,每一帧的下行子帧中都有缓冲区队列中分组的调度结果信息,SS 根据这些信息将被调度的分组在上行子帧中发送,同时生成缓冲区队列剩余分组信息和新到达分组的带宽请求信息,这也会在上行子帧中发送到 BS。不同业务的带宽请求信息的传送策略各不相同:车路协同业务传送频率与车速相关,设计使用捎带方式由 SS 即时发送带宽请求;PTT 语音终端在语音状态发生变化时及时向 BS 上报状态信息;其他两类业务设计使用 EDF(Earliest Deadline First)^[9] 调度,超时分组被丢弃,带宽请求信息中包括未超时分组的个数。

在 BS 的调度中,BS 调度对象包括来自 SS 的带宽请求信息和来自 BS 上层的业务流。BS 综合考虑二者所需要的带宽大小,据此分配上下行子帧的比例,计算车路协同上行总业务量时刻依据式(6)进行。BS 分析来自 SS 的带宽请求信息,并在下一帧的上行子帧中为 SS 缓冲区中的分组分配时隙,这些分配结果作为调度管理信息在下行子帧中以广播或单播的形式发送到所有的 SS;另一方面,BS 调度器以 PQ(Priority Queuing)^[10] 算法调度来自不同业务队列的下行数据,将被选中的分组在下行子帧中发送到对应的 SS。

综上,ITS 的调度以 BS 的调度为主,SS 的调度为辅,两种调度的不同在于 SS 只完成第一级调度,并将第一级调度的结果发送到对应的 BS,BS 完成上行数据的第二级调度和下行数据的两级调度。

2.1 ITS 上行调度

在每一帧的开始首先安排下行子帧,之后是上行子帧,如图 5 所示。下行帧中的 MAP 消息用于广播本帧内上下行子帧结构信息和上下行业务调度信息。

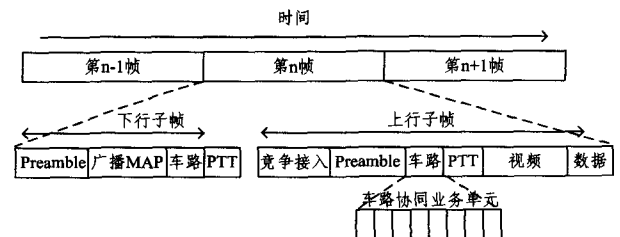


图 5 ITS 帧结构

车路协同业务数据单元为固定长度,每个数据单元包含车辆的三维位置、标识符和速度。如第 1 节所述,车路协同业务期望依据车速确定数据上传频次,因此 BS 根据 SS 上传的车路协同业务数据单元中的车速来确认下一次调度的时机。据此设计车路协同业务的上行调度,如图 6 所示。BS 在每一帧的 MAP 消息中广播需要在本帧上传业务的 SS 的 ID 和上传时隙。BS 维护一个待调度 SS 链表,链表中包含着待调度 SS 的 ID 及其将被调度的帧序号。

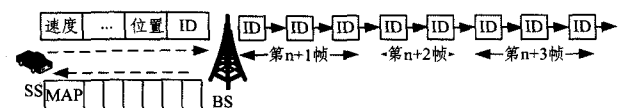


图 6 车路协同业务上行调度示意图

车载 SS 读取 MAP 消息,在上行子帧的指定时隙上传车路协同数据单元,BS 读取其中的速度和 ID,并由式(5)计算出该车载 SS 的车路协同业务所需上传频次,从而可推出下一次调度该车载 SS 的帧号,并将其和 SS 的 ID 一同插入到链表中。完成链表插入后,BS 开始从头遍历链表,准备下一帧的 MAP 消息。

PTT 语音业务是 ITS 的另一个主要业务,如第 1 节所述,语音业务有激活态和静默态两种状态,处于静默态时,业务量小很多,因此若对 PTT 语音采用分配固定资源的方式,则其资源利用率比较低。若将两种状态分别对待,按需分配资源,则可以有效提高资源利用率。在文献[11]中介绍了几种语音调度的基本原理,其中包括全动态调度和状态转换调度。全动态调度方案如图 7 所示。当有上行业务需要发送时,SS 首先将业务分组缓存,并向 BS 发送上行资源请求消息。BS 接收请求消息,为 SS 分配资源,通过下行分配消息通知 SS,SS 在 BS 分配到的资源中发送之前缓存的业务分组。全动态的调度方案资源利用率高,但是由于使用了缓存,增加了业务的时延,另外频繁的资源请求引入了更多的调度开销,因此这种方案不适合 PTT 语音业务。

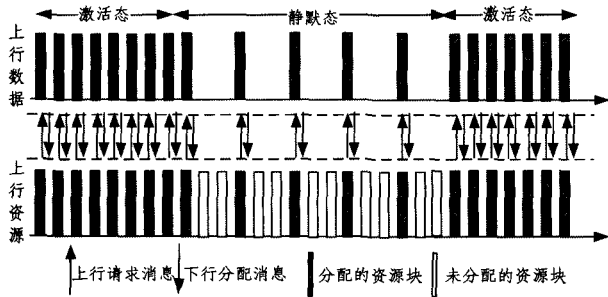


图 7 PTT 语音业务的上行全动态调度示意图

因此设计状态转换调度方案,如图 8 所示,这种方案利用了语音业务的特点:在激活态或静默态中,业务速率都是不变的。所以只需要 SS 在两种状态转换瞬间将下一状态报告给 BS,BS 根据状态报告,为 SS 分配固定的 TDMA 资源,直至下一次状态转换。状态转换的调度方法只在状态变化时进行业务调整,有效地利用了语音业务的特点,而且在业务持续期间,SS 不需要将分组缓存,这样就有效降低了业务时延。状态转换的调度方案的缺点是在从静默态转换至激活态瞬间可能造成少量丢包。但是对语音业务来讲,业务质量更关注时延,可以容忍少量的丢包,并且 PTT 语音连续性较高,转换次数较少,因此状态转换的调度方式优于前面介绍的全动态调度方案。

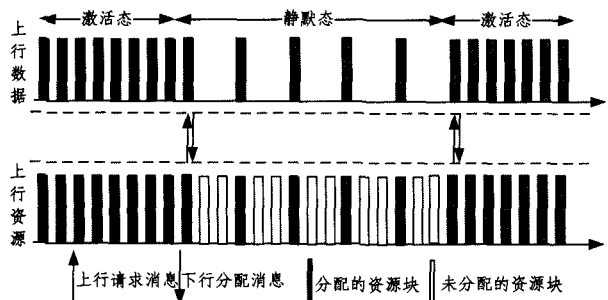


图 8 PTT 语音业务的上行状态转换调度示意图

ITS 视频业务的业务量相对较大而且速率波动也大。由于视频业务主要为非交互性的监控视频,因此视频业务对时延的要求并不高。针对视频业务的这些特点,可以为监控摄像头产生的业务设置一个缓冲器,产生的业务分组缓存后 SS 向 BS 发送捎带请求消息的业务流。视频业务调度方案如图 9 所示。

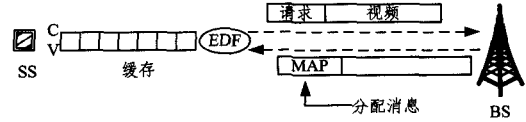


图 9 ITS 视频业务调度示意图

设视频业务请求的资源为 S_{video} 。BS 将 S_{video} 通过下行分配消息发送给 SS,SS 比较 S_{video} 和缓存中的业务量,如果 S_{video} 大于缓存的业务量,则将所有缓存的分组发送到 BS,并填充分配的多余资源;如果 S_{video} 小于缓存的业务量,那么 SS 根据 EDF 算法按照 S_{video} 发送缓存中的分组。SS 中采用 EDF 算法是考虑到监控视频也有一定的时延需求,需要丢弃超时的分组。

ITS 上行调度最后考虑的业务类型是其他数据业务,主要为传感器数据。因为其数据量稳定且较小,所以设计无需请求直接由 BS 为其分配资源的方式,SS 中同样采用 EDF 机制。设 BS 掌握的总资源在优先分配给车路协同业务和 PTT 语音业务之后剩余的资源大小为 S_{left} ,设计视频业务和数据业务按照比例公平的方式来分配 S_{left} 。

3 ITS 业务调度算法的仿真

对前面设计的调度算法在 OPNET 平台上进行仿真,仿真中主要考察算法对各业务类型的 QoS 需求的保证能否达到要求。

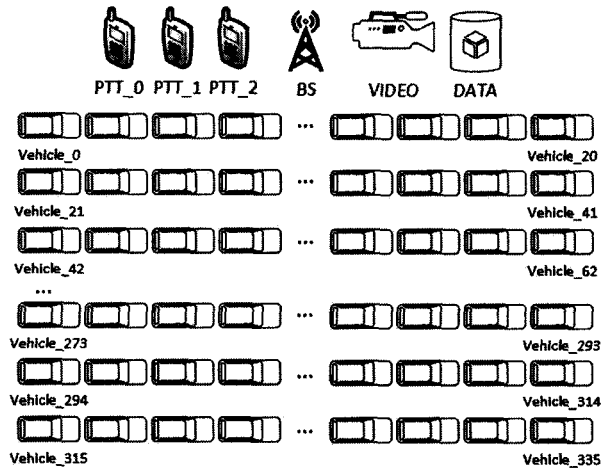


图 10 ITS 上行调度模型

仿真的模型如图 10 所示,有 1 个 BS;336 个 vehicle,每个 vehicle 代表一个车路协同业务节点;PTT 代表 PTT 语音业务节点,共有 3 个;video 代表视频业务,data 代表其他数据业务,分别只有 1 个。仿真程序模拟车辆数量随时间由零线性增加到最大值的过程中各种业务的变化,及调度模块对于这种业务量变化作出的反应。

仿真的结果主要考察丢包率和时延,仿真时间为 1800s,即 30min,所有仿真结果的横轴都是时间。

图 11 表示的是车路协同业务的接收速率,作为 ITS 网络最核心的业务类型,车路协同业务的资源需求在调度

中被优先保证。与前面的分析基本一致的是,车路协同业务的速率呈先增后减的趋势;因为在仿真中使得车辆的上传频次正态分布,所以速率有一定的波动,表现为图中的线条比较粗。

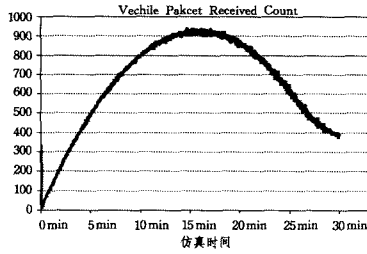


图 11 车路协同业务仿真结果

图 12 表示的是 PTT 语音业务的时延结果,从图中可以看到大部分的 PPT 包的时延小于 0.01s,可以很好地满足语音的需求。

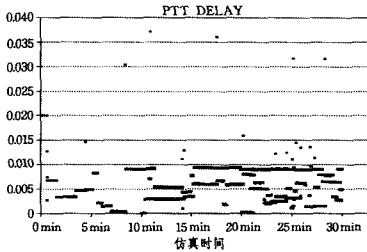


图 12 PTT 语音业务时延仿真结果

视频业务的生成和接收速率的比较如图 13 所示。从中可以看出,视频业务的生成速率波动很大,而接受速率相对来说整齐一些,这主要是由于视频的调度在 SS 端采用了缓存的方法:在生成速率较大时将不能及时发送的 video 包缓存,因为长时间来看 BS 分配给视频终端的总的资源是足够的,所以总的来看视频没有丢包,只是增加了延时。这还可以从图 14 中看出。

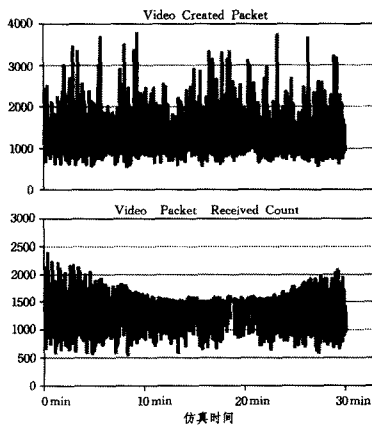


图 13 视频业务的生成和接收仿真结果

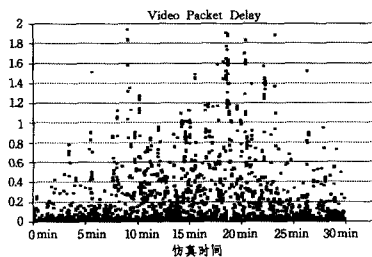


图 14 视频业务的时延仿真结果

从上面的仿真结果来看,所设计的调度方法有效地满足了各业务的 QoS 需求。在真实的网络中,可能在参数方面与仿真中有所不同,但是业务满足同样的规律,因此可以为真实的网络设计提供参考。

结束语 结束语 ITS 的业务种类较多,按照业务的主要的 QoS 要求(如业务的重要程度、时延要求以及丢包率)的不同,将业务分为车路协同业务、PTT 语音业务、视频业务和其他数据业务 4 类。车路协同业务是 ITS 的最核心的业务,参考交通流理论中有关平均车速和车流密度的关系以及车速分布的模型,以理论推导的形式对车路协同业务的业务流量进行了计算,得到基站覆盖范围内业务流量和车辆数之间满足二次函数的关系。基于以上业务建模分析,针对几类 ITS 业务,在 ITS 无线接入网接口分别设计了适应车速的动态调度方法、基于状态转换的调度方法和缓存请求的调度方法,并在 OPNET 平台上对调度方法进行仿真,验证了延时、丢包率等关键性能满足各类业务 QoS 要求,为 ITS 接入网的网络设计提供了参考。

参 考 文 献

- [1] 陆化普,李瑞敏,朱茵. 智能交通系统概论[M]. 北京:中国铁道出版社,2004:79-82
- [2] 陈文辉. 面向 ITS 的无线接入网物理层承载技术研究 with 实现[D]. 南京:东南大学信息科学与工程学院,2011
- [3] IEEE 802.11p-2010, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments[S]. IEEE Standards Association, 2010
- [4] Hossain E, Chow G, Leung V, et al. Vehicular Telematics over Heterogeneous Wireless Networks: A Survey[J]. Computer Communications, 2010, 33(7): 775-793
- [5] 晋胜波. 面向 ITS 的无线 Mesh 多跳接入网 MAC 层技术研究[D]. 南京:东南大学信息科学与工程学院,2010
- [6] 丹尼尔·马林. 交通流理论[M]. 北京:机械工业出版社, 2007:226-239
- [7] Yang T, Tsang H. A novel approach to estimating the cell loss probability in a multiplexer with homogeneous ON-OFF sources[J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(1): 117-126
- [8] Chu Guo-song, Wang Deng, Mei Shun-liang. A QoS Architecture for the MAC Protocol of IEEE 802.16 BWA System[J]. IEEE 2002 International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions, 2002, 1(29): 435-439
- [9] Chipalkatti R, Kurose J F, Towsley D. Scheduling policies for real-time and non-real-time traffic in a statistical multiplexer[C]// IEEE INFOCOM'89, 1989: 774-783
- [10] Golestani S J. A Self-clocked Fair Queuing Scheme for High Speed Applications[C]// Proc. INFOCOM'94, 636-640
- [11] 寇会如,毕海洲,谢永斌. LTE 系统语音业务调度研究[J]. 数字通信, 2007(1): 14-17
- [12] 郑鹏宇,何世彪,张馨月,等. 一种基于博弈论的无线网状网络信道分配算法[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版, 2013, 27(4): 90-95