

宽带多媒体卫星通信系统 QoS 架构设计与仿真验证

冯少栋 边东明 张更新 李广侠

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

摘要 为解决宽带卫星通信系统中多媒体业务 QoS 的保障问题,参考 Diffserv 模型建立了系统 QoS 架构,针对系统上行链路为多用户共享接入的特点,进行了星地一体化联合设计,其中星上资源动态分配算法基于联合自由/按需分配多址接入协议进行扩展,在用户终端采用两级排队调度策略,通过分级调度算法实现业务与系统 QoS 的映射。在此基础上搭建宽带多媒体卫星通信地面仿真验证系统,测试了业务传输性能。测试表明,本架构对实时多媒体业务的 QoS 可提供较好的保障,达到了现有系统的实测水平。

关键词 卫星通信,多媒体,服务质量,仿真

中图分类号 TP393.02 **文献标识码** A

Broadband Multimedia Satellite Communication System QoS Framework: Design, Simulation and Verification

FENG Shao-dong BIAN Dong-ming ZHANG Geng-xin LI Guang-xia

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract In order to provide Quality-of-Service (QoS) guarantees for multimedia services in the broadband satellite communication system, the system QoS framework was designed based on Diffserv. An integrated system design was carried out both on the satellite and the user terminals. The onboard dynamic resources assignment scheme was proposed by improving Combined Free/Demand Assignment Multiple Access (CFDAMA). A two-stage terminal queuing and scheduling strategy was presented. The broadband multimedia satellite communication hardware in-the-loop simulation system was developed, the measurements show that our system can bearer real-time multimedia services very well. The results are similar to the real system tests.

Keywords Satellite communication, Multimedia, QoS, Simulation

宽带多媒体卫星通信系统作为以传输高速宽带多媒体业务为主的一种卫星通信系统近年来获得了迅猛发展。与传统卫星通信系统相比,其最大的不同在于承载的业务由低速的数据、话音业务(一般为 64kbps 以下)转变为集图像、声音、视频、文本为一体的高速率、交互式多媒体业务。由于多媒体业务种类繁多,如何在宽带卫星通信系统中保障其服务质量(Quality of Service),成为迫切需要解决的问题。为此,欧洲标准化组织(ETSI)就宽带多媒体卫星通信系统的 QoS 架构定义了一系列标准建议^[1-3],但标准并没有给出具体实现机制,因此在各种卫星应用环境中如何进行 QoS 架构的设计与实现,成为各国研究学者普遍关注的问题^[4-6]。本文基于静止轨道(GEO)多波束星上交换的卫星通信系统进行 QoS 架构设计,并通过搭建地面仿真系统进行了验证。

信关站、网控中心等网络实体,系统组成如图 1 所示。各实体所完成的功能如下:

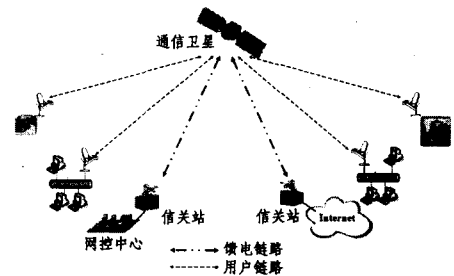


图 1 宽带多媒体卫星通信系统组成

宽带通信卫星:完成用户信号从上行链路到下行链路的处理与转发。在本系统中,卫星采用高速 ATM 交换方式,卫星可将来自不同波束的信号还原为基带信元流,再根据信元头的标识,转发至相应的下行波束。

用户终端:作为独立设备与用户网络(通常为局域网)相连,使用户设备(一般为 PC 机)能够通过卫星信道接入到与

1 宽带多媒体卫星通信系统设计

1.1 系统组成及工作原理

宽带多媒体卫星通信系统通常包括通信卫星、用户终端、

到稿日期:2009-07-09 返修日期:2009-09-16 本文受国家自然科学基金资助项目(60702021,60972061,60972062),江苏省自然科学基金资助项目(BK2009060),江苏省“333 高层次人才培养工程”项目,解放军理工大学通信工程学院学员创新项目资助。

冯少栋(1981-),男,博士生,主要研究方向为宽带卫星通信等,E-mail:fengshaodong1981@163.com;边东明(1976-),男,讲师,主要研究方向为卫星通信等;张更新(1967-),男,教授,主要研究方向为卫星通信、通信网络等;李广侠(1964-),男,教授,主要研究方向为卫星通信、通信网络等。

信关站相连的 Internet 或与其它用户设备通信;

信关站:为卫星通信系统与地面网络(或服务提供商)的连接提供接口,根据需要接口形式可为帧中继、E1、IP 接口等,在本系统中为 IP 接口;

网控中心:用于完成整个卫星通信系统的运行与控制,其中包括入网注册、鉴权、星载设备的配置与管理等,通常通过 IP 接口与信关站相连。

根据信号体制的不同可将系统中的通信链路分为两类:

一是信关站与卫星之间的链路(称为馈电链路),该链路业务相对固定,上下行链路均为时分复用(TDM)方式,可采用固定分配体制和较长的业务突发。

二是用户终端与卫星之间的链路(也称用户链路),下行用户链路与馈电链路类似,采用 TDM 广播方式,上行用户链路为众多用户终端共享,采用多频时分多址接入(MF-TDMA)体制。

系统工作流程如下:

由用户设备(通常为 PC 机)产生的多媒体业务,经用户终端变为中频调制信号通过无线链路到达卫星,经卫星解调译码还原为基带信元,通过高速 ATM 交换,再经卫星处理转发至信关站(或目的用户终端)所在的下行链路波束,信关站(或目的用户终端)根据信元头标识进行相应的处理(接收、业务适配等),由此可实现用户终端之间的网状通信或经信关站实现 Internet 宽带接入等应用。

1.2 QoS 架构设计

QoS 保障是宽带卫星通信系统能否真正得到广泛应用的关键所在,也是当前网络研究的热点问题。但由于 Internet 规模巨大,结构体系复杂,发展统一的 QoS 保障体系受到诸多因素制约,因此很难得到大规模的应用,也使得广域范围内端到端业务的 QoS 难以得到保障。与此相比,卫星通信系统(尤其是基于对地静止轨道卫星)具有网络拓扑结构相对简单、覆盖范围广、可快速部署等优势,便于建立统一的 QoS 保障体系。

1.2.1 总体描述

在宽带卫星通信系统中,实现 QoS 保障需综合考虑实现难度和网络特点,以选择合适的模型。当前 Internet 的 QoS 模型主要有 IntServ、Diffserv 和 MPLS 3 种。在 IntServ 模型下,系统基于每条业务流进行端到端的 QoS 保障,可通过信令为业务流进行资源预约;在 Diffserv 模型下,系统主要根据 IP 数据包中的区分服务代码点(DSCP)进行不同优先级的服务保障。相比之下,Diffserv 更具可扩展性和灵活性。考虑到星上实现复杂度和资源预留的代价问题,本系统采用 Diffserv 模型和“天简地繁”的设计思想,由处于网络边缘的用户终端进行 IP 数据包的分类调度并转换为 ATM 信元,卫星只负责进行 ATM 信元的高速交换和转发。

Diffserv 针对不同 DSCP 标识的 IP 数据包进行不同的转发处理^[7](即每跳行为 Per Hop Behavior,PHB),通过 PHB 将用户终端的带宽和缓存在各业务等级之间进行分配,目前支持 3 种处理方式:

加速转发^[8](Expedited Forward,EF):优先级最高,数据包离开用户终端的速率须不小于事先约定的速率,用户终端需为此类业务预留专门的带宽和缓存;

确保转发^[9](Assured Forward,AF):相对较为复杂,细

分为 4 类,用户终端可为每类保证最小带宽和缓存,每一类中还分为 3 种丢弃等级;

默认转发(Default Forward,DF):优先级最低,等同于尽力而为(Best effort)业务。

在宽带卫星通信系统中实现 Diffserv 最大的问题在于用户链路上行为众多用户共享,用户终端获得的输出带宽在动态变化中,为 Diffserv 的实现带来一定难度,因此需要综合利用星上资源动态分配(通过星上资源调度器实现)和用户终端排队调度两个关键算法对不同业务的 PHB 进行区分。这两点也是本文重点阐述的问题。

1.2.2 星上资源调度器设计

星上资源调度器用于管理上行用户链路的无线资源,协调众多用户终端共享上行信道。该调度器基于 CFDAMA 协议^[10]进行改进,CFDAMA 协议最重要的特点是在按需分配的基础上将系统剩余的时隙资源以自由方式分配给波束内处于激活状态的终端,以确保资源分配的公平性。由于原 CFDAMA 协议主要针对时延不敏感的数据业务设计,为了实现对各种多媒体业务的支持,对原有协议进行了扩展。用户终端可根据多媒体业务的 PHB 采用不同资源申请方式,由星上资源调度器统一进行分配。终端的资源申请方式参考 DVB-RCS 标准的最新版本^[11],主要分为以下几类:

(1)连续速率分配(CRA)方式:在该方式下,调度器在每帧都为终端分配固定数量的时隙,可保证业务最小的传输时延和延时抖动,而且无需终端提出申请,由系统根据终端类型,在终端入网之后进行分配。

(2)基于速率申请(RBDC)方式:由终端主动发送申请,请求方式为传输速率,根据初始设定,系统可在连续几个超帧范围内保证终端的服务速率。几个超帧过后,如果该终端没有新的 RBDC 申请,则自动失效。对于调度器来说,来自同一终端的 RBDC 请求会覆盖其前一个 RBDC 请求。终端每次申请的 RBDC 有一个上限,也称为 $RBDC_{max}$,超出上限部分,资源调度器将自动按照 VBDC 方式进行分配。

(3)基于容量申请方式(VBDC):与 RBDC 一样是由终端发起,请求方式为时隙的个数。与 RBDC 不同的是,来自同一个终端的 VBDC 请求可以累加,系统会根据可用容量通过一帧或多帧逐步满足 VBDC 请求。此外,为了防止个别终端独占系统资源,对终端的 VBDC 申请还有一些参数限制:

$VBDC_{max}$:系统在一帧内能够为同一个终端分配的最大值;

$VBDC_{max\ backlog}$:终端每次能够申请的时隙数目最大值;

$VBDC_{timeout}$:终端发出申请后等待时间的最大值。

(4)基于容量绝对值申请方式(AVBDC):应用于丢包率较高(如信道条件较差或随机接入信道)的环境中,请求方式与 VBDC 相同,但不具备累加性,来自同一终端的 AVBDC 请求会将其上个请求覆盖。

(5)自由分配方式(FCA):由于资源分配算法以帧为周期进行工作,在业务负载不大的情况下,资源调度器会自动将每个分配周期结束后剩余的时隙分配给终端。FCA 无需终端申请,可根据具体算法或实际需要分配给每一个终端或特定终端组。

在以上 5 种资源申请与分配方式中,第(1)、第(5)种方式无需信令交互,而第(2)~第(4)需要信令的交互并且第(3)、

第(4)种不同时使用。

星上资源调度器算法包括两个关键算法：一是用户请求列表更新算法，主要用于更新各用户终端的资源请求；二是系统资源分配算法，主要用于为用户终端分配时隙资源，如图2所示。这两个算法以帧为周期进行顺序触发，通常是在一帧起始点开始执行。由于用户终端的请求可能在一帧的任意时刻到达，为此调度器设有资源请求缓存队列。到达的资源请求先进入缓存队列，在每帧起始先由请求列表更新算法进行处理。请求列表更新完毕之后，再启动资源动态分配算法，流程如图3所示。在该算法中CRA请求优先级最高，其次是RBDC，VBDC，最后是FCA。作为可选项，AVBDC方式暂不考虑。

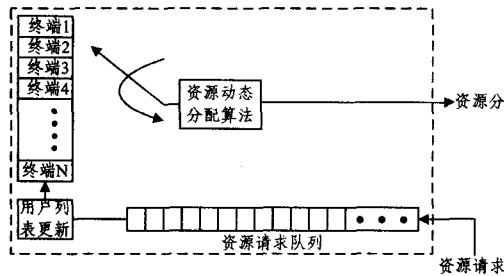


图2 资源调度器算法设计框图

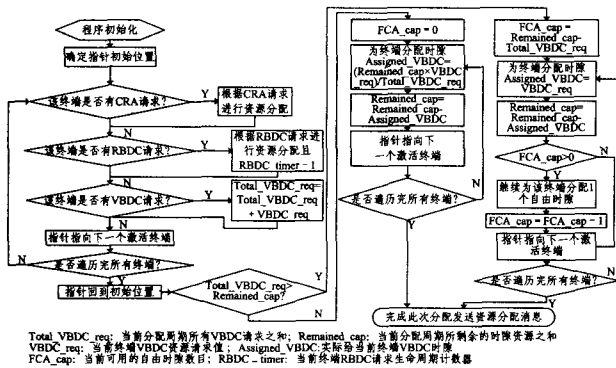


图3 资源动态分配算法工作流程

从图3中可以看出，在每个帧周期，资源调度器都要对用户列表进行两次遍历：第一次主要处理用户终端的CRA和RBDC请求。第二次将剩余的时隙分配给VBDC请求，如果剩余时隙无法满足所有VBDC请求，则按照每个VBDC请求在所有VBDC请求之和中所占的比例进行分配。如果在满足所有VBDC请求的基础上仍有剩余时隙资源，再以FCA方式进行分配。为了提高分配效率，VBDC和FCA的分配同时进行，如图3所示。为提高信令传输效率，针对同一个终端的CRA、RBDC、VBDC、FCA分配信息通过一个资源分配应答信令下发，再由终端自行进行业务调度。

为了实现分配的公平性，本系统FCA分配以轮询方式进行，每次分配完毕之后都要记录当前分配指针所处的位置，下个帧周期从上次记录的位置开始分配。

1.2.3 用户终端排队调度机制设计

用户终端基于Diffserv架构实现。业务到达用户终端后，先由用户终端根据业务类型进行相应处理(如分类、排队、调度等)。这种分布式的方法一定程度上简化了星上资源调度器的设计，也使得星上资源调度器设计与所承载的业务相独立，增强了系统的扩展性和灵活性。用户终端设计框图如图4所示，包括业务分类器、IP包队列缓存、IP包队列调度处理器、MAC层信元队列缓存、MAC层信元调度处理器5个部

分。

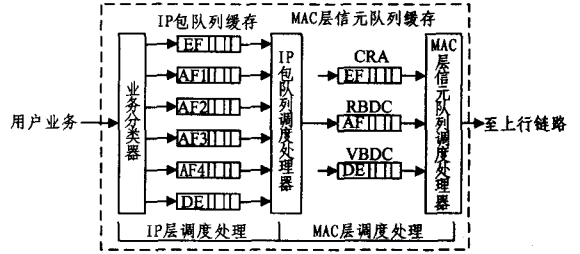


图4 用户终端排队调度设计框图

(1) 业务分类器：对来自用户网络的IP数据包进行分类和准入控制，根据源目的地址、端口号、DSCP标识将其排入不同的IP包队列缓存。

(2) IP包队列缓存：对来自业务分类器的数据包进行缓存，根据Diffserv模型，分为EF、AF和DE3个类别，其中AF又细分为AF1、AF2、AF3、AF44个等级。

(3) IP包队列调度处理器：根据调度算法对IP包队列缓存中的数据包的进行调度，并将IP数据包转换为等长的ATM信元填入相应的MAC层信元队列缓存。

(4) MAC层信元队列缓存：对来自IP包队列调度处理器的ATM信元进行缓存，MAC层信元队列分为EF、AF和DE3个类别。为便于系统实现，对于EF业务采用CRA的资源分配方式。AF业务采用RBDC资源申请方式，DE采用VBDC资源申请方式，考虑到FCA在业务负载较大时无法提供QoS保障，因此只作为前3种的补充，由系统根据业务负载进行分配。

(5) MAC层信元调度处理器：一方面根据信元队列缓存情况生成各种用户终端资源请求，另一方面利用系统分配的时隙资源对3个MAC层信元队列进行调度。经过调度的信元通过相应处理(信道编码、调制、突发成形等)发送至系统上行链路。

考虑到Diffserv模型主要针对IP数据包及卫星通信系统的特殊性，用户终端的设计采用了两级排队调度机制，如图4所示。一级在IP层，主要针对IP数据包进行处理，完成Diffserv所需的分类、准入控制和排队调度；另一级在MAC层，针对ATM信元进行处理，主要完成卫星上行链路时隙资源的申请、分配和调度。IP包队列调度处理器为两层之间提供了接口，负责完成IP数据包到ATM信元的转换。

2 地面仿真验证

地面仿真验证是利用硬件模块在地面构建场景、参数可控的模拟系统，通过场景、参数的控制，最大程度地模拟系统真实的运行环境，直观评估系统设计方案的可行性与完备性。地面仿真验证是目前评估卫星通信系统方案设计和关键技术最直观有效的手段之一。美国MIT Lincoln实验室^[12]、欧洲专门针对宽带卫星通信系统的科研项目SatNEX^[13]中都明确将地面仿真验证作为卫星通信系统研制过程当中的关键步骤。

本文所搭建的宽带多媒体卫星通信地面仿真验证系统除了包括实际系统的网络实体之外，还包括信道模拟器及用于系统性能测试的软件环境等。如图5所示，用户终端、信关站、卫星分别通过L波段中频电缆与信道模拟器相连，网控中心及用户设备(PC机)分别通过高速以太网与信关站和用户终端相连。用户终端和信关站均采用基于CPCI体系构架的工业控制计算机来实现，以最大限度地保证设备的可靠性

与灵活性。

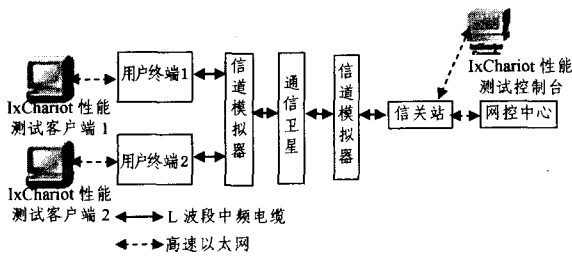


图5 地面仿真系统连接示意图

性能测试包括接口物理指标测试和业务传输性能测试。其中业务传输性能测试主要衡量系统对实际业务的承载能力,测试采用 Ixia 公司推出的宽带 IP 网络性能测试软件 IxChariot。该软件运行于 Windows 平台上,可模拟多种多媒体业务,并对业务的多项性能指标进行统计收集,从而评估网络性能,测试连接如图 5 所示。通过在两台 PC 机(分别与两个用户终端相连)上运行 IxChariot 客户端软件,同时模拟 4 条时延带宽敏感的 VOIP 业务(符合 64kbps G. 711 标准)及 1 条带宽敏感的流媒体业务(512kbps),对系统综合业务传输保障能力进行测试。测试参数的配置及参数收集由运行在另一台 PC 上(与信关站相连)的测试控制台完成,测试时间为 150s。在本测试中,用户链路上行载波速率为 1.25Mpsps,下行载波速率为 2.5Mpsps。馈电链路上下行载波速率均为 2.5Mpsps,测试结果如图 6、图 7、图 8 所示。

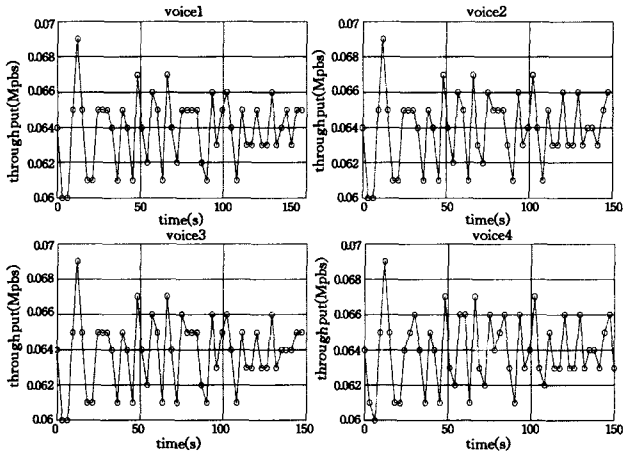


图6 VOIP 带宽保证

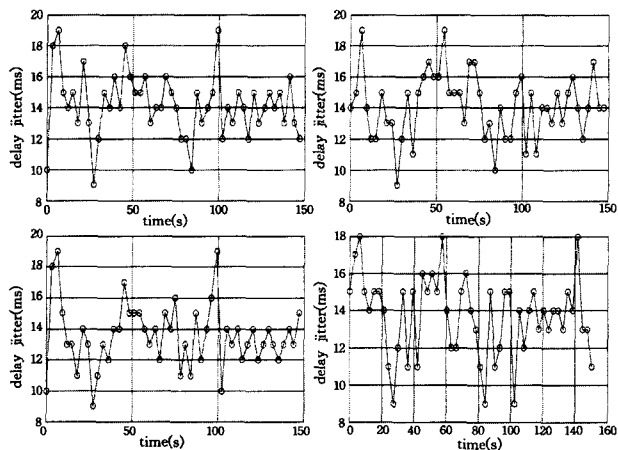


图7 VOIP 延时抖动

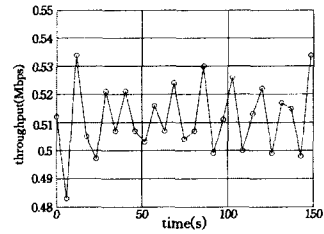


图8 流媒体带宽保证

从测试结果可以看出,对于 VOIP 业务,可保证带宽不小于 60kbps,延时抖动不超过 20ms,达到了当前宽带卫星通信系统 Spaceway3 系统在带宽“按需分配”模式下的实测结果,优于其“尽力而为”模式下的实测结果^[14]。对于流媒体业务,在选取的 27 个时间抽样点中,仅有 5 个抽样点速率小于 500kbps,占 18%,基本满足流媒体播放要求。测试表明,本地面仿真系统可对实时的多媒体业务提供较好的 QoS 保障。

结束语 如何在复杂度不大的前提下为多媒体业务提供 QoS 保障,是近年来宽带卫星通信研究的热点问题。本文基于 Diffserv 模型,综合采用卫星资源动态分配和用户终端两级排队调度算法实现了对实时性多媒体业务的 QoS 保障,并在此基础上搭建地面仿真验证系统,验证了算法的可行性。对于系统容量和承载用户数的分析是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] ETSI. Satellite Earth Stations and Systems (SES); Broadband Satellite Multimedia (BSM); QoS Functional Architecture[S]. 2006
- [2] ETSI. Satellite Earth Stations and Systems (SES); Broadband Satellite Multimedia (BSM); Interworking with IntServ QoS [S]. 2007
- [3] ETSI. Satellite Earth Stations and Systems (SES); Broadband Satellite Multimedia (BSM); Interworking with Diffserv QoS [S]. 2007
- [4] Tou I, Gineste M, Gayraud T, et al. Quality of service evaluation in satellite systems[C] // Satellite and Space Communications, 2008. IWSSC 2008. IEEE International Workshop. 2008: 133-137
- [5] Boccolini G, Luise M, Garnier B, et al. Bringing multimedia services to digital-divide end-users with smart 2-way satellite technologies: The UNIC EC FP6 project[C] // Satellite and Space Communications, 2008 (IWSSC 2008). IEEE International Workshop. 2008: 150-154
- [6] Hongfei D, Haiyang W, Ke X. Hierarchical Packet Scheduling for Satellite Multimedia Broadcasting, An Adaptive QoS-aware Design[C] // Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE, 2008: 1-5
- [7] Blake S, Black D, Carlson M, et al. RFC2475: An Architecture for Differentiated Services[Z]. IETF, 1998
- [8] Davie B, Charny A, Bennett J C R, et al. RFC3246: An Expedited Forwarding PHB (Per-Hop Behavior)[Z]. IETF, 2002
- [9] Heinanen J, Baker F, Weiss W, et al. RFC2597: Assured Forwarding PHB Group[Z]. IETF, 1999

(下转第 69 页)

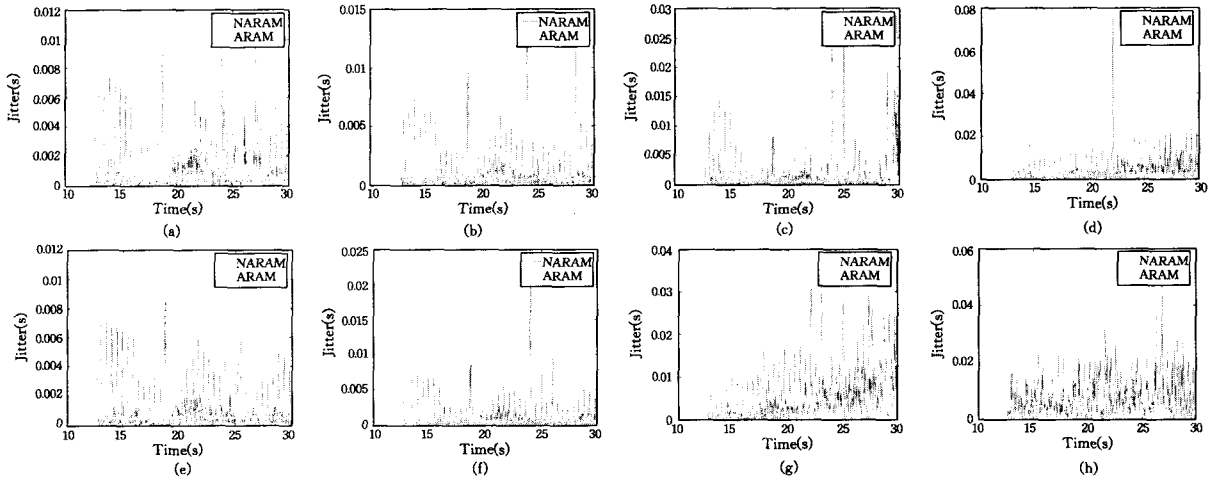


图5 抖动

结束语 无线移动 ad hoc 网络传输的特性使得在无线环境下为流媒体应用提供 QoS 保证面临更多的挑战。针对无线流媒体传输,本文提出一种应用于无线移动 ad hoc 网络实时流媒体传输的自适应速率调节机制(ARAM)。本机制使用 GM(1,1)模型预测网络状态,根据预测得到的带宽信息结合队列管理策略自适应地调节节点的发送速率。数学分析和仿真实验均表明,本机制显著提高了无线移动 ad hoc 网络中流媒体传输的可靠性和实时性,同时有效地节省了其对网络容量的消耗。

参考文献

[1] Eshghi F, Elhakeem A K. Performance analysis of ad hoc wireless LANs for real-time traffic[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(2): 204-215

[2] Wu H, Chuang P. Dynamic QoS Allocation for Multimedia Ad Hoc Wireless Networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2001, 6(4): 377-384

[3] Setton E, Zhu X, et al. Minimizing distortion for multi-path video streaming over ad hoc networks[C] // Proceedings of International Conference on Image. Singapore, 2004, 3(3): 1751-1754

[4] Gharavi H, Ban K. Dynamic adjustment packet control for video communications over ad-hoc networks [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Paris, France, June 2004; 3086-3090

[5] Hollot C V, Misra V, et al. Analysis and design of controllers for AQM routers supporting TCP flows[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002; 945-959

[6] CHEN J X, YI Y, et al. An Enhanced Active Queue Management Algorithm[J]. Computer Science (China), 2007, 34(8): 86-87

[7] Berger D, Ye Z, et al. TCP-friendly medium access control for ad-hoc wireless networks; Alleviating self-Contention [C] //

Proceedings of International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems. Fort Lauderdale, USA, Oct. 2004; 214-223

[8] Zhu Xiaoliang, Du Xu, et al. A Wireless TCP-friendly Rate Control Mechanism for Streaming Delivery[J]. Journal of Chinese Computer Systems (China), 2007, 28(4): 577-582

[9] Zhang L, Dai G Z, et al. A Wireless Ad Hoc Network Reliable UDP Protocol [J]. Computer Simulation, 2009, 26(2): 162-165

[10] Chen Y Q, Chen X G. On adaptive MPEG-4 rate controlling in self-similar wireless network environment [J]. Journal on Communications, 2005, 26(5): 17-23

[11] Wang H T, Song L H, et al. An simple Mechanism for cross-layer flow control over Ad Hoc network and its performance analysis [J]. Chinese High Technology Letters (China), 2007, 17(10): 1002-1006

[12] Setton E, Yoo T, et al. Cross-layer design of ad hoc networks for real-time video streaming[J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(4): 59-65

[13] Qu Q, Pei Y, et al. Cross-layer QoS Control for Video Communications over Wireless Ad Hoc Networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2005, 12(4): 59-65

[14] Deng J L. Introduction to grey system theory[J]. The Journal of Grey System, 1989, 1(1): 1-24

[15] Cao Y Z, et al. Gray Model GM(1,1) Based On MATLAB Language and Its Application in the Prediction of Dust Fall in Guangzhou City [J]. Environmental Monitoring in China, 2006, 22(5): 54-59

[16] Wu Q, Tao J, et al. Adaptive congestion control algorithm in wireless multimedia networks[J]. Journal on Communications (China), 2006, 27(12): 48-54

[17] Chen K, Xue Y, et al. Understanding bandwidth-delay product in mobile ad hoc networks[J]. Computer Communications, 2004, 27(10): 923-934

(上接第 63 页)

[10] Le-ngoc T, Leung V, Takats P, et al. Interactive Multimedia Satellite Access Communications[J]. IEEE Communications Magazine(S0163-6804), 2003, 41(7): 78-85

[11] ETSI. Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems[S]. 2009

[12] MIT Lincoln Laboratory 2008 Annual Report MIT Lincoln Laboratory, 2008[2009]

[13] Decola T, Ronga L, Pecorella T, et al. Communications and networking over satellites; SatNEX experimental activities and testbeds[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking(S1542-0981), 2009, 27(1): 1-33

[14] Chandrasekharan S, Arnold S, Gopal R. Situational awareness with real time IP applications over next generation packet processing satellites[C] // Military Communications Conference. (MILCOM 2008). IEEE, 2008; 1-7