

基于带宽按需分配的宽带卫星无线资源管理技术研究综述

秦 勇 张 军 张 涛

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘 要 无线资源管理技术是宽带多媒体卫星通信研究的一个重要内容。如何有效应对多媒体业务的突发性问题,以获得业务 QoS 与资源利用率之间的较好平衡,是无线资源管理技术面临的主要挑战。基于带宽按需分配的卫星无线资源管理机制是一个有效的解决途径与发展方向,也是目前研究的热点。在分析基于带宽按需分配的卫星无线资源管理体系结构的基础上,将其分解为 5 个主要功能部分,并将现有宽带卫星无线资源管理技术的研究成果分别对应到这 5 个功能,重点对每个功能近年来的实现算法进行了分类总结,并分析比较了各类算法的特点与存在的问题,最后就进一步的研究方向提出了建议。

关键词 卫星通信系统,无线资源管理,宽带多媒体通信,带宽按需分配,综述

Overview on RRM Based on BoD in Broadband Multimedia Satellite Systems

QIN Yong ZHANG Jun ZHANG Tao

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract Radio Resource Management (RRM) is an important researching aspect in broadband multimedia satellite communication. Dealing effectively with burst characteristic of multimedia to achieve balance between QoS of traffics and resource utility is the main challenge for RRM. The RRM based on bandwidth is an effective approach for this challenge, which is also becoming the research hotspot at present. By analyzing the framework of RRM based on BoD for broadband satellite systems, this article decomposed the framework into five main function parts. Furthermore, the existing research achievements were corresponded to these five function parts. The classifying and overview on various methods for each function part were mainly discussed, and the characteristic and shortcomings for each class of arithmetic were analyzed. At last, suggestions on further research direction were proposed.

Keywords Satellite communication system, Radio resource management, Broadband multimedia communication, Bandwidth on demand, Review

1 引言

宽带卫星通信是当前通信技术的一个重要发展方向。对于未来宽带 GEO 卫星网络,为了适应多媒体业务的高突发性特点(如高的峰值速率比),并支持多媒体业务的各种 QoS 需求,有效的无线资源管理(Radio Resource Management, RRM)机制设计是一个关键问题。

无线资源管理所要解决的根本问题就是如何在系统资源利用率和用户 QoS 满意度之间达到一种平衡。从系统的角度看,通常希望达到系统资源的最大利用率或容纳最多的接入用户,从而达到效益最大化;而从用户的角度则希望无论何时何地系统都能够提供足够的资源供用户接入,以得到满意的 QoS。显然,两者利益是矛盾的,而多媒体业务的高突发性则是导致该矛盾的根本原因。

目前,通过带宽按需动态分配(Bandwidth on Demand, BoD)来解决上述矛盾是一个备受关注的方向。该方法就是在通信过程中,根据用户发送的带宽资源请求为用户分配带

宽,而非在连接建立时确定带宽分配数量。该方法能够应对多媒体业务的高突发性,可有效提高无线资源的利用率^[1]。自从 DVB-RCS 宽带卫星接入技术标准^[2](2003 年)提出采用带宽按需分配以来,基于带宽按需分配的宽带卫星通信无线资源管理技术就成为了研究热点^[3]。该技术中又包含多个具体技术,即由多个子功能构成基于带宽按需分配的卫星无线资源管理的功能体系结构。然而,目前尚没有文献就此功能体系结构及技术现状进行系统的研究与归纳。

因此,本文就宽带卫星通信中基于带宽按需分配的无线资源管理的功能体系结构及研究现状进行探讨,提出一种体系结构的功能划分,对现有技术和算法进行归纳分类,并提出需要进一步研究的问题,以期明确未来研究的方向。

2 宽带多媒体卫星无线资源管理体系

对于宽带卫星通信,无线资源管理需要解决 3 个方面的问题:一是由于卫星无线资源的共享性,如何解决多个用户有序的共享无线资源;二是由于卫星无线资源的稀缺性,如何高

到稿日期:2009-03-06 返修日期:2009-06-02 本文受国家自然科学基金(60625102,60532030)资助。

秦 勇(1981—),男,博士生,主要研究方向为卫星移动通信无线接入技术、无线资源管理,E-mail:qinyong@ee.buaa.edu.cn;张 军(1965—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为空地一体化网络;张 涛(1973—),男,博士,副教授,主要研究方向为移动卫星通信网络。

效地利用无线资源;三是由于用户业务的多样性,如何保证不同业务的 QoS 要求。从功能方面看,无线资源管理体系包括卫星 MAC 协议、接入控制机制、链路层带宽分配和物理层资源分配等核心功能。其中,卫星 MAC 协议是无线资源管理体系的基本框架,不同的 MAC 协议构成了不同的卫星无线资源管理体系,其他 RRM 功能都在该体系的框架下运行,并且实现算法必须与 MAC 协议具有一致性。

卫星 MAC 协议的主要功能是解决多用户以何种方式共享无线资源的问题。现有的卫星 MAC 协议分为 3 大类,分别对应 3 种宽带卫星无线资源管理体系。

(1) 随机接入类

随机接入协议,即 ALOHA 协议最早由夏威夷大学于 1970 年提出。在此基础上又发展了 S-ALOHA, CSMA, PR-MA, 树分协议和 DQRAP 等一系列随机接入类协议。基于该类协议的无线资源管理体系比较简单,不需要复杂的资源管理与分配功能。在随机接入中,所有时隙对于所有用户都是可用的。每个用户可以在随机选择的任何时隙发送自己的数据,如果发生了冲突,数据将被破坏,需要重传。这种方式导致的结果是时延大小不确定。在低负载情况下,时延较小;而在高负载时,时延很大,不能保证时延要求和业务服务质量,尤其不能适合实时业务传输;另外,随机接入的无线资源利用率很低。目前,宽带卫星通信无线资源管理体系不单独采用随机接入类协议,而一般将其作为其他体系中的补充,与按需分配类协议组合使用。

(2) 带宽固定分配类

带宽固定分配又称为静态带宽分配。在连接建立时,就为其分配一定的专属于该连接的带宽,直到该连接结束。这类基于带宽固定分配的无线资源管理体系实现简单,能够保证较低的业务时延,但不能适应业务流的变化。对于突发性数据,尤其是均峰值比较大的变比特率(VBR)数据,带宽利用率低。该体系特别适合于业务速率稳定、具有严格时延限制的业务,如语音、视频等实时业务,因此目前在以语音通信为主的卫星系统中应用广泛,而对于多媒体通信卫星系统,带宽固定分配方式仍然可作为一个补充。

(3) 带宽按需分配类

带宽按需分配是针对多媒体业务的突发性提出的解决方法,该方法包含带宽申请和带宽分配两个阶段。首先用户根据业务实际需求发送容量请求,无线资源管理器根据用户需求为其分配资源。因而带宽分配能够跟踪实际业务的动态性,从而可以有效提高资源利用率。但由于 GEO 卫星链路的长传播延时,带宽请求/分配过程增加了业务时延。因此,高资源利用率与低业务时延之间的矛盾是基于带宽按需分配的无线资源管理体系需要解决的一个核心问题,是近年来的研究热点。

目前,采用带宽按需分配方式已经成为宽带多媒体卫星系统设计与实现的趋势,DVB-RCS 卫星接入技术标准中明确提出采用按需分配方式,多个宽带多媒体卫星系统设计(比如欧洲宽带多媒体卫星计划中的 WISDOM 项目^[4]、SATIP6 项目^[5]等)也采用该方式。

3 基于带宽按需分配的无线资源管理技术

目前宽带卫星通信系统,比如 WISDOM^[4], SATIP6^[5],

EuroSkyWay^[6]等系统设计一般以 MF-TDMA 技术作为用户接入卫星的多址方式,这也是 DVB-RCS 卫星通信技术标准中采用的多址接入技术^[2]。

基于带宽按需分配的 MF-TDMA 宽带卫星无线资源管理体系如图 1 所示^[23]。无线资源管理器集中管理和控制所有终端的无线资源分配,其主要功能包括终端呼叫接入控制和无线资源分配。终端在无线资源管理体系中的主要功能是向无线资源管理器发起资源申请。无线资源管理器可以位于星上,也可位于地面控制中心。

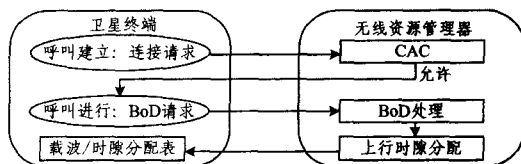


图 1 基于带宽按需分配的无线资源管理体系

基本工作流程如下:

(1)终端在发起一个呼叫即呼叫建立阶段,首先向无线资源管理器发送连接请求,该连接请求包含了终端请求的业务特征描述(比如业务类型、容量请求类型等),以及服务质量(QoS)参数要求的描述(比如最小速率、峰值速率、最大时延、最大时延抖动等)。

(2)无线资源管理器接收到终端的连接请求后,运行呼叫接入控制功能(CAC),判断该终端的连接请求是否能够被接入。无线资源管理器在为连接分配资源之前运行 CAC,其目的是保证该连接的接入不会影响到其他已经接入的各种业务的 QoS,同时该连接的 QoS 也能够得到满足。如果没有预先的接入控制过程,网络将出现无法控制的拥塞状态。

(3)如果 CAC 允许该终端的连接请求,则把接入允许信令发送给终端,终端进入带宽按需分配(BoD)请求过程。

(4)在带宽按需分配(BoD)过程中,终端根据当前状态(比如业务到达速率、缓冲区队列长度等)实时计算所需的动态带宽资源,生成相应的 BoD 请求发送到无线资源管理器。

(5)无线资源管理器的 BoD 处理功能模块对所有终端的 BoD 请求进行处理。BoD 处理模块根据一定的公平性和效率方面的要求,以及在频率/时隙矩阵中分配时隙资源的限制,对终端的 BoD 请求进行处理,以提供给上行时隙分配模块所需的信息。

(6)上行时隙分配模块完成上行链路时隙在 MF-TDMA 帧中的分配,并生成相应的时隙分配表,广播给终端。终端根据 TBTP 表中分配的时隙进行数据传输。

可见,基于带宽按需分配的 MF-TDMA 宽带卫星无线资源管理体系包括 5 个主要功能/算法,如图 2 所示。

一是通过卫星按需分配 MAC 协议解决如何在用户与卫星之间实现资源按需分配的问题;

二是通过接入控制机制解决是否允许用户接入的问题;

三是通过 BoD 带宽请求算法解决用户如何确定其当前需要的带宽资源的问题;

四是通过带宽分配算法解决如何根据 BoD 请求为每个用户分配时隙数量的问题;

五是通过时隙位置分配算法解决每个用户的时隙在 MF-TDMA 帧中的具体位置分配问题。

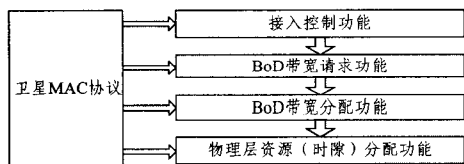


图2 基于带宽按需分配的卫星宽带 RRM 体系的功能结构

3.1 卫星按需分配 MAC 协议

按需分配 MAC 协议实际就是带宽请求机制与分配机制的组合。带宽请求机制又称为带宽预约方式,规定了用户终端如何获得向卫星传输 BoD 请求的机会,带宽分配机制则规定了资源管理器如何根据用户的请求分配时隙资源。不同的带宽请求机制与分配机制的组合构成了不同性能特点的卫星按需分配 MAC 协议。

3.1.1 带宽请求机制

目前主要有以下几种典型的方式:

专用信道

在终端连接建立后,为终端分配专门的信令信道,用于发送 BoD 请求。

随机竞争

随机竞争法指终端自主发送 BoD 请求,既可以随机选择发送时机,也可以通过系统规定的算法计算得出。如果多个用户选择了相同的传输机会,则会发生碰撞,用户需采用退避算法等待一定时间后再选择传输机会发送 BoD 请求。

周期查询

周期查询即轮询,资源管理器按照一定的轮询规则为终端分配时隙资源,用于终端发送 BoD 请求。一般对于不同类型/优先级业务采用不同的轮询周期。

捎带方式

捎带方式是终端将 BoD 请求捎带在当前发送的数据包里传输。

上述带宽请求机制可以单独与某种带宽按需分配机制构成按需分配协议,也可由多种预约方式组合。

3.1.2 带宽分配机制

基于带宽按需分配的协议中,带宽分配是以 BoD 带宽申请为基础进行的,资源管理器根据接收到的用户带宽请求进行动态的带宽分配。为提高业务的时延性能,带宽按需动态分配机制往往与其他机制进行组合^[7],典型的包括随机竞争、固定分配、自由分配。

3.1.2.1 随机/按需组合分配机制

结合了按需分配(预约)机制和随机接入机制的优点。在低负载时能够实现低延时,在高负载时能获得较高的信道利用率。缺点在于需要使用调度器监视随机接入信道可能发生的冲突,处理时间长,可靠性低。

3.1.2.2 固定/按需组合分配机制

在保证用户分配一定数量带宽的前提下,剩余带宽按照按需分配的方式,其效率依赖于系统负载和分配给地面站的固定带宽大小。

3.1.2.3 自由/按需组合分配机制

在自由分配机制中,当所有固定和按需分配的时隙都已经分配之后,剩余的时隙则称之为自由时隙,按照某种自由分配的原则,如轮询分配、加权轮询、基于优先级分配等分配给终端。自由/按需组合分配机制成功地结合了按需分配和自

由分配方式,在低信道负载下实现了低时延,在高信道负载下实现了高信道利用率。

预约时隙根据用户需求分配,剩余时隙按照自由分配原则进行分配,一般采用轮询方式或基于某种加权算法。

3.1.3 基于不同请求方式组合的按需分配协议

对于上述几种带宽组合分配机制,还可以与不同的 BoD 请求机制(预约方式)相结合,构成不同的按需分配协议。

典型的组合按需分配协议包括采用预定时隙预约的 CF-DAMA-PA 协议、采用随机接入方式预约的 CFDAMA-RA 协议和采用捎带方式预约的 CFDAMA-PB 协议,以及以上 3 种基本预约方式的组合协议。文献中描述的是,采用混合式随机接入/捎带预约方式的 CFDAMA-CR 协议^[8]、采用轮询预约方式的 CFDAMA-RR 协议^[9]、采用预测预约方式的 CF-DAMA-PR 协议^[10]、采用混合式轮询/捎带预约方式的 CF-DAMA-RPR 协议^[11]等。

通过文献中协议性能的分析可见,不同类型的组合协议具有各自的特点,适合不同的业务类型组合及系统负载情况。

3.2 接入控制算法

为了保证网络稳定运行,防止过多用户接入而造成拥塞,无线资源管理需要对新的连接请求的带宽需求和可用资源进行估计,并决定新连接是否允许接入。该功能通过连接接入控制(CAC)机制实现。

尽可能接入多的用户来提高资源利用率,同时保证接入业务 QoS 要求,是 CAC 的根本目的,这需要尽可能地提高业务带宽需求和可用无线资源估计的准确性。CAC 机制及其算法的设计需要在卫星 MAC 协议的框架下进行,并充分考虑卫星通信的特点,比如传输时延大、不同业务带宽需求的动态变化等特点。

虽然 CAC 的研究已经经历了较长时间,但新的算法仍不断提出,以适应宽带多媒体业务和通信技术的不断发展。对地面有线网络和无线通信系统,已经提出了较多的 CAC 算法,文献[12-14]对此进行了较全面的总结。对于宽带多媒体卫星通信的研究近几年已成为通信领域的研究热点。提出的针对卫星宽带通信的 CAC 算法主要可以分为以下几类。

3.2.1 基于参数申明的 CAC 策略

基于参数的接纳控制策略是根据数据源的先验特征计算出最坏状态下所有已经被接纳业务流所占用的带宽资源,一般是判断已有连接的峰值速率与新连接的峰值速率之和是否小于总链路容量,比如 EuroSkyWay(ESW)卫星系统^[6]。该策略的无线资源利用率在业务流平滑的情况下通常是可以接受的,但对于具有突发性的多媒体业务,卫星链路的利用率非常低^[6]。并且该策略建立在系统能获知精确的流量特性的基础上,如果实际流量与申明的流量参数不符合,则会大大降低控制算法的性能。

3.2.2 基于业务模型的统计复用 CAC 策略

该 CAC 策略主要借鉴了地面 ATM 网络的统计复用思想,通过对单个业务源进行建模来计算多个业务接入后的统计复用带宽超过链路总容量的概率。如果新连接接入后的统计复用带宽超过链路总容量的概率不大于设定门限,则允许接入。此类 CAC 策略的具体实现与业务源模型密切相关。

(1)通用业务模型

将可变速率业务建模为二状态马尔可夫模型(ON-OFF

模型)是目前广泛采用的一种建模方式。该方式对于业务类型不具有针对性,适用广泛,但对于不同类型业务存在程度不同的建模误差。

Antonio Iera 等人^[6]通过分析可变速率业务的建模,采用二状态马尔可夫模型(ON-OFF 模型)计算可变速率业务进行统计复用后带宽超过链路容量的概率(excess demand probability, EDP)。如果新连接接入后 EDP 低于门限值,则允许其接入,否则拒绝请求。文献^[15]针对 VoIP 语音业务采用类似的统计复用方法,基于 ON-OFF 模型,分析了在一定链路容量下能够容纳的 VoIP 语音数据流。

(2) 针对特定类型业务的模型

这类针对特定类型业务的建模方式具有较高的精确度,但适应范围有限。Pasquale Pace 等人^[16]则针对 MPEG 视频这类实时可变速率业务的统计复用,将 MPEG 视频流建模为具有一定平均数据率和方差的正态分布模型;而 Floriano De Rango 等人^[17]将 MPEG 视频流建模为有限状态马尔可夫链(FSMC),并将流带宽需求化分为固定的 L 个级别,然后求解系统容量过载概率和视频分组(GOP)丢失率,用于 CAC 接入判断。

(3) 带宽按需分配协议下的业务模型

上述两类基于业务模型的 CAC 策略主要是借鉴了地面 ATM 网络中的统计复用分析方法及现有典型的业务模型。但卫星无线带宽资源是基于分配方式的,分配给某个用户的资源就不能被其他用户占用。由于业务带宽的动态性,如果分配给某个用户的带宽大于其实际需要,则该部分多余带宽也不能被其他用户所用,因此不能实现类似于地面 ATM 网的带宽完全统计复用。虽然宽带卫星系统基于带宽按需分配的 MAC 协议从理论上可以实现无线带宽的完全复用,但带宽申请/分配过程引入的固有时延对业务模型和 CAC 算法带来了一定的影响。

Antonio Iera 等人^[18]在文献^[6]提出的基于 ON-OFF 模型的统计复用 CAC 策略的基础上,考虑到卫星系统长时延的特点,通过时序图的方法分析了 BoD 机制下长时延对业务突发性的影响,指出卫星长时延将导致可变速率业务实际的 ON 区间增大,相当于降低了业务的突发性,从而 CAC 算法可以接入更多的业务。吕蓉等^[19]则通过控制模型分析了带宽按需分配对 ON-OFF 业务模型的影响,从理论上证明了按需分配协议将改变可变速率业务的业务模型参数,使得 ON 区间增加,在一定的业务负载范围内,采用按需分配协议能够接入更多的可变速率业务。

可见,这种基于业务模型的统计复用接入控制策略可提高带宽资源的利用率^[20],但也存在一些问题^[20,21]。

- 基于统计复用的 CAC 算法只能以某种概率保证业务的 QoS 要求,不能严格满足每个连接的 QoS 要求。

- 现有的基于统计复用的 CAC 算法是基于一个确定性或随机模型,在用户事先给出的现有和新到来流的流量特性说明的基础上做出的。如果实际流量与声明的流量参数不符合,则会大大降低控制算法的性能,从而破坏对业务的 QoS 保证。这对于那些不能事先精确描述流量特性,尤其是没有确定参考模型的用户来说是比较困难的。

- 由于业务的多样性和新业务的不断出现,以及业务数据流在网络内经过汇聚、整形、管制或排队等,业务流特性可

能发生改变,难以用参数或模型准确描述业务数据流的特性。

- 现有的基于统计复用的 CAC 算法一般是基于预知或简化的应用流量模型,有些接纳控制算法^[15-17]仅仅适合于某些特定的应用系统,如 Video on Demand。

- 带宽按需分配机制对业务模型造成影响。

- 现有的基于统计复用的 CAC 算法往往过于复杂,卫星处理能力有限,很难满足系统实时性的要求。

3.2.3 基于有效带宽的 CAC 策略

基于有效带宽的 CAC 方法基于如下思想:所有统计复用流的总有效带宽等于每个独立业务流的有效带宽之和,因此只需要估计新连接请求的有效带宽,判断新连接与已有连接的有效带宽之和是否小于链路总容量即可^[22]。该 CAC 策略源于地面 ATM 网络的 CAC 策略,其关键在于准确估计每个业务流的有效带宽。现有的针对卫星系统的有效带宽估计方法主要以地面无线系统中的方法为基础,以卫星信道模型替代地面无线信道模型得到。

这些 CAC 算法仍然是一种基于模型的方法,依赖于业务模型和无线信道模型,与基于统计复用的 CAC 算法存在类似的问题。

3.2.4 基于 BoD 机制的 CAC 策略

前述的 3 类 CAC 策略均是源于地面 ATM 网的接入控制思想,未考虑到 CAC 策略与 MAC 协议的相互影响。在宽带卫星系统中无线资源管理由多个功能单元协同完成,各功能单元之间必须具有一致性,CAC 策略须在 MAC 协议的框架下运行,并与 MAC 协议兼容。因此,多篇文献^[23,24,26]在研究基于带宽按需分配的无线资源管理体系的同时,提出了相应的 CAC 策略。这类基于 BoD 机制的 CAC 策略避开了业务建模、信道建模等问题,不针对特定的业务类型或业务模型,能较好地适应日新月异的多媒体应用。并且这类 CAC 策略基于按需分配协议设计,有利于宽带卫星通信系统无线资源管理的设计与实现。

文献^[23]等针对 ATM 卫星通信,将可用容量分为固定容量和 BoD 容量,并按照 ATM 业务分类方式,对于 CBR, VBR 和最小速率的 ABR 业务固定分配一定的带宽以保证 QoS。只要连接的总带宽小于可用固定容量,则接入新连接。而其他无 QoS 要求的业务,则采用 BoD 方式,这类连接均允许接入。这类 CAC 策略的固定容量与 BoD 容量的比例对性能影响较大。

文献^[24]提出了一种动态调整固定容量与 BoD 容量比例的 CAC 策略。该文的 CAC 算法实际上是将可用资源分为 3 部分:固定容量(CBR)、公共部分(CPR)和突发容量(BoD),对于 CBR, VBR 和最小速率的 ABR 都采用 CBR 方式,其他采用突发容量。根据 BoD 请求队列的门限值动态调整 CBR 对公共资源的占用情况,即动态调整两类业务的可用资源,从而控制新呼叫的接入。

上述策略并未考虑业务本身带宽需求的动态性,文献^[25,26]则将单个业务的需求分为固定需求和 BoD 需求两部分。如果新连接请求与已有连接的固定带宽和 BoD 带宽的总和小于总链路容量,则允许接入。这类 CAC 策略中所有连接共用带宽,其关键在于如何估计每个连接的固定需求和 BoD 需求。不同的分配比例将影响业务的 QoS 和系统资源利用率,文献中没有给出具体方法。

现有基于 BoD 机制的 CAC 策略研究还不深入。如何准确估计 BoD 带宽请求经过统计复用后的实际占用带宽,以及单个业务的固定需求和 BoD 需求比例,仍然是需要进一步研究的关键问题。

3.3 BoD 请求估计算法

带宽请求估计算法是按需分配 MAC 协议的基础,直接影响到传输时延和链路利用率^[27]。带宽请求算法主要面临业务 QoS 保证与系统资源利用率之间的矛盾:一方面,终端为了保证业务 QoS,降低传输时延,希望尽可能多地申请带宽;另一方面,为了提高卫星链路利用率,系统希望终端尽可能少地申请带宽。因此,带宽请求算法需要在业务 QoS 要求与系统资源利用率之间进行折中,在满足 QoS 要求的同时,尽可能提高资源利用率。

3.3.1 基于队列长度的估计算法

基于队列长度的 BoD 估计算法是一种纯反应式(purely reactive)的方法^[26],仅根据当前队列的长度发送 BoD 请求,请求带宽容量等于队列长度。这种方式实现简单,但业务时延较大,且队列长度变化随业务突发性增大而增大,适合无 QoS 要求的 Best Effort 业务。文献[26]进一步考虑了资源管理器不能在一个分配周期内满足用户的 BoD 请求时,引入关于请求和分配结果的记忆性。资源管理器记录该周期分配时隙的亏欠量并尝试在下一周期进行补偿,而终端则在下一个 BoD 请求时在当前队列长度基础上减去亏欠量,该方法部分提高了业务时延性能,但需要较多的信令交互且要求终端与资源管理器的信息严格同步,实现复杂度较高。

3.3.2 基于业务预测的估计算法

基于队列大小的纯 reactive BoD 算法仅仅利用当前状态信息。对于 GEO 卫星系统,长时延将降低其性能,而利用对于未来业务的预测信息将减轻长时延的影响^[28-32]。因此,不少文献针对业务预测在 BoD 机制中的应用进行了研究。目前研究主要分为两个方向:基于业务模型的方法和基于通用预测模型的方法。

(1) 基于业务模型的方法

基于业务模型的方法一般是针对特定类型的业务,通过业务模型预测未来流量。该方法针对性强,预测的准确性依赖于业务建模,具有一定的应用局限性,不适合多类型业务。

文献[8]提出一种简单的基于当前统计周期内信元到达的统计量作为下一周期的流量预测的带宽申请方法。该方法实现简单,假设的业务模型是每 L 帧内业务到达流量基本不变,适合于比较平滑的业务流,对于突发性强的业务不适合。文献[29]提出一种基于业务突发性预测的 BoD 算法,采用 ON-OFF 业务模型,通过预测业务突发的开始(ON 周期开始)申请带宽。该方法仅适合于符合 ON-OFF 模型的业务,即业务可以看作是由一系列突发期和空闲期组成。文献[30]针对 Internet 自相似业务流提出基于统计预测的方法,将自相似业务流建模为 N 个 ON-OFF 业务的聚合流,并将业务流量分为 L 个级别。通过状态转移矩阵计算下一个状态概率最大的业务流量级别,该方法主要是针对 Internet 数据业务预测,不适合实时业务。而文献[31]则提出了针对视频会议流的预测方法,在对基于 H. 263 视频标准的 VBR 编码器产生的视频会议流进行建模的基础上,根据模型预测视频会议流的带宽变化,以此生成带宽请求。A. Omari 等^[32]在结合已

有几种算法的设计思想的基础上,提出一种利用了 MAC 队列长度信息、业务预测且具有记忆性的 BoD 请求算法。

(2) 基于通用预测模型的方法

基于通用预测模型的方法不针对特定业务类型,具有较广的适用范围。

文献[28,33]针对多个业务的聚合流建立了基于自回归(Auto-Regressive)过程的聚合流预测模型,对未来业务量进行预测。根据后移限位(receding-horizon)策略计算 BoD 带宽请求,并通过调整代价函数的加权来获得在链路利用率和时延之间的平衡。但该算法属于 N 维的二次规划问题,计算复杂度较高。

3.3.3 基于控制理论的估计算法

前述两类 BoD 请求估计算法都是基于队列当前长度,而对于队列长度的变化没有控制,队列长度变化较大,甚至队列溢出,导致业务时延抖动剧烈^[97]。

文献[34,35]基于控制理论对 BoD 机制进行了研究,将 BoD 机制建模为具有时延(时延等于 BoD 带宽请求与分配周期)的反馈控制系统,并引用 Smith 预测器来解决时延导致的系统不稳定性问题,从而提出了一种以终端队列长度为控制目标的 BoD 带宽请求算法,使得终端队列长度始终跟踪设定的参考值。该算法以经典的控制论为基础,不依赖于业务模型,适合任何业务源,能够有效保证 BoD 系统的稳定性。但上述方法没有考虑业务特点以及卫星链路上行负载,始终保证分配时隙资源的完全利用,时延性能较差^[36]。文献[36]在此基础上进一步提出了根据系统负载实时调整参考队列长度的 BoD 估计算法,当系统负载较轻时,终端参考队列长度随之减小,从而降低终端队列长度,减小业务时延,充分地利用了无线资源。

3.3.4 基于信道状态预测的估计算法

以上方法都是以估算业务速率为目的,未考虑业务传输时所需的 MF-TDMA 时隙数量的估算,或者在假设无线信道状态保持不变、终端传输速率固定的条件下,通过业务速率与时隙数量对应关系的简单计算得到 BoD 请求时隙数量。由于终端/卫星的移动性以及雨衰的因素,导致卫星信道是一个动态衰落信道,采用自适应编码调制等技术可有效补偿衰落^[37]。但这将导致终端传输速率发生动态变化,即对于 MF-TDMA 宽带卫星系统在传输相同业务速率的情况下需要的时隙数量不同。

文献[38]提出了卫星雨衰情况下的时隙数量预测估计算法。根据建立的卫星雨衰链路的 Markov 模型预测雨衰等级,以此确定满足一定误比特率的突发速率和调制方式,从而计算所需要的时隙数量。文献[37]则根据文献[39]提出的随机雨衰模型,预测和计算在不同周期内需要的时隙资源。这类基于信道状态预测的 BoD 请求估计方法仅考虑信道状态变化对所需时隙资源数量的影响,对于所采用的信道模型或信道状态测量准确性的依赖性较强。

3.4 BoD 带宽分配算法

无线资源管理器在接收到终端发送的 BoD 带宽请求后,需要根据一定的带宽分配算法为每个终端分配带宽资源。带宽分配算法的目的是保证业务 QoS、业务的公平性和系统资源的高利用率。

目前提出的 BoD 带宽分配策略可分为两大类:一是基于

队列调度的带宽分配策略,二是基于完全共享的带宽分配策略。

3.4.1 基于队列调度的带宽分配策略

该类方法是将终端发送的 BoD 带宽请求按照一定的规则(比如业务优先级)进行分类和排队,资源管理器再按照一定的调度规则从队列中逐个取出请求,并为其分配所请求的资源。

最简单的方法是采用先入先出方式^[25,40],对所有的 BoD 带宽请求采用统一的 FIFO 队列进行排队,并对其逐个进行资源分配。该方法实现简单,但不区分业务类型,在高负载或拥塞情况下不能保证实时业务的 QoS。因此,文献[41]提出一种基于卫星等待时间优先的多优先级队列调度的 BoD 带宽分配策略,该方法根据 BoD 请求等待时间计算优先级,带宽分配首先满足最高优先级的请求。

这种针对 BoD 请求的调度不同于传统的地面网络针对数据包调度,地面调度策略并不能完全适合宽带多媒体卫星的这种带宽按需分配机制^[41]。目前,基于 BoD 请求队列调度的带宽分配方法的研究还较少。

3.4.2 基于完全共享的带宽分配策略

基于完全共享的带宽分配策略的基本思想是同时处理一个资源请求/分配周期内的所有带宽请求,按照一定的分配算法将该分配周期内总的可用资源分配给所有带宽请求。

文献[28]提出一种比例分配方法, $v_i =$

$$\begin{cases} u_i, & \text{if } \sum_{i=1}^N u_i \leq C \\ \frac{C}{\sum_{i=1}^N u_i} u_i, & \text{otherwise} \end{cases}, \text{其中 } u_i \text{ 表示用户 } i \text{ 的请求带宽, } v_i \text{ 表}$$

示分配给用户 i 的带宽, C 为总带宽。比例分配法实现简单,适合处理能力有限的卫星进行星上实时处理,但没有区分不同业务类型,且某些用户过多的带宽请求将导致分配算法的不公平性。文献[26]提出了一种基于博弈论的公平共享带宽的方法,首先在满足连接的预定 BoD 请求(BR_i)的基础上,如果实际 BoD 请求(RR_i)大于 BR_i ,则对剩余带宽进行分配,使得 $\max_{j=1}^N \alpha_j$, 且 $\alpha_i \leq \max(0, (RR_i - BR_i))$ 。该方法保证了剩余带宽分配的公平性,但仍然没有考虑业务之间的优先级差别。文献[42]则提出针对不同类型业务混合的最优化带宽分配策略,将带宽最优化分配建模为二元整数规划问题,对不同业务采用不同的加权系数,根据加权系数代表的物理意义不同,比如时延、业务优先级等,可以得到不同目的最优化带宽分配。算法适用范围较广,但计算复杂度较高。文献[43]提出一种基于预测的自由容量分配算法,在满足所有带宽请求的基础上仍然剩余的带宽称之为自由容量。卫星根据终端带宽请求量的变化来预测其未来的业务变化趋势,据此预测结果对自由容量进行分配。该方法适用于慢变特性的业务以及系统负载较轻的情况。

3.5 时隙位置分配算法

在 MF-TDMA 宽带卫星系统中,无线资源管理器根据带宽分配算法,在确定为用户分配的带宽资源的数量(即时隙的数量)后,需要确定这些时隙在 MF-TDMA 帧中的具体位置,并将这个结果通过时隙分配表的形式告知用户^[2,38]。而时隙在帧中的位置分配可以有多种方式,比如连续分配、均匀分

配、随机分配等,如图 3 所示。

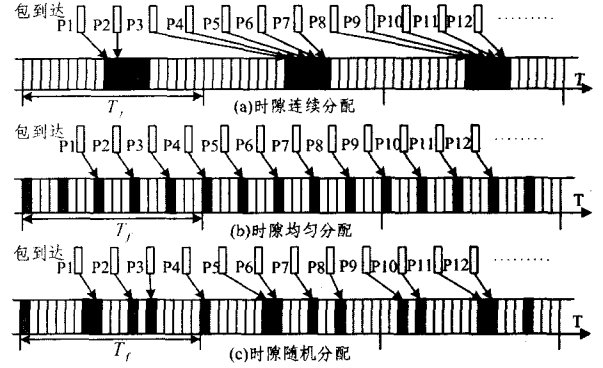


图 3 时隙位置分配方式

传统的方法都是默认采用时隙连续分配方式。时隙位置分配算法的重点在于当带宽分配算法为用户 i 分配的时隙数量为 C_i 时,如何在 MF-TDMA 帧中找到连续的 X_i ($X_i \geq C_i$) 个空闲时隙位置分配给用户 i 。典型的方法是基于空闲时隙搜索的方法,如文献[38]将此问题看作是动态装箱问题的变形,并提出了一种 RCP(Reserve Channel with Priority)算法。该算法针对传统的 first fit 和 best fit 搜索算法搜索空间大、耗时长的问题,通过为用户预留载波的方式将用户分配时隙位置限定在某个特定载波上,从而减小搜索空间,能够在较低的处理开销的情况下完成时隙位置的分配。但当用户数量较多时,RCP 算法效率随之降低。基于空闲时隙位置搜索的方法随着 MF-TDMA 帧中时隙数量和用户数量的增加,搜索空间急剧增加,并且不能完全利用时隙资源。文献[44]采用一种简单的顺序排列法,从时隙分配表的最低编号的时隙开始,按照一定的用户顺序(如用户 ID 顺序)依次分配给用户。该方法实现简单,时隙利用率高,但用户的时隙位置在每个分配周期重新分配后不固定,不适合具有固定时隙分配需求的应用情况。

笔者在最近的研究^[45]中分析了不同的时隙位置分配方式对于业务时延性能的影响,通过对 MF-TDMA 的帧长度、终端分配的时隙数量及位置分布与业务时延性能之间的关系进行建模分析,指出在其他条件相同的情况下时隙位置分配越均匀,业务的时延性能越好。据此提出了一种时隙位置均匀分配算法,根据二进制编码倒序的原理实现时隙位置的均匀分配,实现简单,相对于传统的时隙连续分配方式能够有效提高宽带卫星通信的时延性能。

时隙位置分配算法是影响 MF-TDMA 系统时延性能的一个重要因素。尤其是在一些宽带多媒体卫星通信中,为提高帧效率,便于星地时间同步以及降低资源分配处理负载,帧长度设计一般较长,如 WINDS 系统帧长 640ms^[4], SatIP6 系统帧长 305ms^[5]。这时,时隙位置对于时延的影响将更突出。然而,目前此项研究较少,据笔者所知,仅在笔者最近的研究^[45]中对此进行了一定的研究,但仍待更深入的研究。

4 总结与展望

近年来,卫星宽带通信技术的研究受到了越来越多的关注。如何有效应对多媒体业务的突发性问题,以获得业务 QoS 与资源利用率之间的较好平衡,是宽带卫星无线资源管理面临的主要挑战。通过对现有卫星无线资源管理技术体系

的比较分析可知,基于带宽按需分配的卫星无线资源管理体系是一个有效的解决途径与发展方向,也是目前研究的热点。

通过分析基于带宽按需分配的卫星无线资源管理方式的工作流程,本文将其体系结构分解为5个主要的功能模块,将现有卫星宽带无线资源管理技术的研究成果分别对应到此5个功能,并分别对每个功能的实现算法进行了分类总结,分析比较了各类算法的特点。虽然现有研究成果已较多,但研究仍然以单个技术点为主,整体性较弱,且算法研究的应用场景不明确,不统一,笔者认为在未来的研究中仍存在问题值得注意。

(1) 整体性能优化问题

基于带宽按需分配的无线资源管理体系是由5个功能部分组成的一个整体,每个功能都对整体性能产生影响,且各功能之间具有较强的联系。如何最优化卫星宽带无线资源管理的整体性能,是目前尚未研究的问题。

(2) 实时业务在 BoD 机制中的应用

如何有效地处理实时业务,是卫星系统 BoD 机制面临的一个难题。地面 WiMAX 系统^[1-4]采用实时轮询的方式实现对实时业务的按需分配,由于其往返时延很小(微秒级),因此可以通过周期性地为终端分配 BoD 请求发送机会。只要分配周期与业务动态性相当,即可有效应对实时业务的动态变化。但卫星系统固有的长时延使得该方法不能适用。目前的 BoD 机制中一般对于实时业务仍采用固定分配方式以保证实时性要求,而实时多媒体业务将在宽带多媒体卫星业务中占有较大比例。有效地将 BoD 机制应用于实时业务,对于提高系统资源利用率至关重要,且涉及机制的所有功能部分。

(3) 单业务流与聚合业务流

在宽带多媒体卫星通信中,终端往往需要同时传输多个业务。BoD 请求/分配算法是以单个业务流还是以聚合业务流为基本的申请/分配单位,是 BoD 机制需要考虑的一个基本问题。目前卫星通信研究中二者均有采用,在地面 WiMAX 标准^[46]中则是针对单个业务流。多媒体卫星系统具有通信容量大的特点,采用单个业务流方式将导致资源管理器极大的处理负载,并增大信令开销。采用聚合业务流方式则可改善上述问题,这也符合多媒体卫星系统终端的应用背景(如作为地面网络的接入点)。这种以聚合业务流作为基本的申请/分配单位的 BoD 机制需要算法具有较好的自适应性,既能有效处理大量业务聚合流,又能适应少量业务聚合流,甚至单个业务流。

基于带宽按需分配无线资源管理技术是未来宽带多媒体卫星通信的发展方向,具有重要的研究意义与应用价值,其研究还将继续深入进行。

参 考 文 献

- [1] Kota S L. Broadband satellite networks trends and challenges [C]//IEEE Communications Society / WCNC. 2005;1472-1478
- [2] ETSI EN 301 790 (V1.3.1). Digital Video Broadcasting (DVB): Interaction channel for Satellite Distribution Systems [S]. 2003
- [3] Skinnemoen H, Vermesan A, Satcom N, et al. VoIP over DVB-RCS with QoS and bandwidth on demand[S]. IEEE Wireless Communications, October 2005;46-53
- [4] Nakao M, Kadowaki N, et al. Outline of the WINDS Onboard

- Switch for Regenerative Repeating [C] // 21st International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit. 2003
- [5] Pietrabissa A, Inzerilli T, Alphand O, et al. Validation of a QoS architecture for DVB-RCS satellite networks via the SATIP6 demonstration platform[J]. Computer Networks, 2005, 49: 797-815
- [6] Iera A, Molinaro A, Marano S. Call admission control and resource management issues for real-time VBR traffic in ATM-satellite networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(11): 2393-2403
- [7] Peyravi H. Medium access control protocols for space and satellite communications: a survey and assessment[J]. IEEE Communications Magazine, 1999, 37(3): 62-71
- [8] 林建优, 郭庆, 刘功亮. 基于宽带多媒体卫星网络的 MAC 协议[J]. 通信学报, 2006, 27(8): 134-138
- [9] Mitchell P D, Grace D, Tozer T C. Comparative performance of the CFDAMA protocol via satellite with various terminal request strategies[C]// Global Telecommunications Conference. San Antonio: IEEE, 2001, 4: 2720-2724
- [10] 周熙, 贾世楼. 随机接入预约 CFDAMA-PR MAC 协议性能分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(9): 1196-1199
- [11] 周熙, 贾世楼, 余阳. 改进型卫星 CFDAMA MAC 协议时延性能分析[J]. 南京理工大学学报, 2005, 29(1): 77-80
- [12] Ahmed M H. Call admission control in wireless networks: a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2005, 7(1): 50-69
- [13] 马育锋, 龚沈光, 胡修林, 等. 蜂窝无线通信网络呼叫允许控制分析[J]. 通信学报, 2006, 27(5): 107-114
- [14] 陈永强, 汤志忠, 吴舜贤. 基于测量的接纳控制算法研究综述[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(12): 2819-2824
- [15] Garroppo R G, Giordano S, Pagano M. Estimation of token bucket parameters for aggregated VoIP sources[J]. Int. J. Commun. Syst., 2002, 15: 851-866
- [16] Pace P, Alois G, Marano S. Efficient real-time multimedia connections handling over DVB-RCS satellite system[J]. IEEE Communications Society Globecom, 2004: 2722-2727
- [17] De Rango F, Tropea M, Fazio P, et al. Call admission control with statistical multiplexing for aggregate MPEG traffic in a DVB-RCS satellite network[J]. IEEE Globecom, 2005: 3231-3236
- [18] Iera A, Molinaro A, Marano S. Traffic management techniques to face the effects of intrinsic delays in geostationary satellite networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(1): 145-155
- [19] 吕蓉, 曹志刚. 卫星 ATM 网络中结合 DA 协议的接纳控制[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(7): 943-946
- [20] Perros H G, Elsayed K M. Call Admission Control Schemes: A Review[J]. IEEE Common Mag, 1996, 34(11): 82-91
- [21] 徐名海, 糜正琨. 多业务 IP 网络呼叫接纳控制模型和算法[J]. 计算机工程与应用, 2005(12): 138-142
- [22] 吕蓉, 曹志刚. 采用自适应 FEC 的卫星 ATM 网络的有效带宽估计[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(10): 1513-1520
- [23] Priscoli F D, De Santis M, Faggiano A. Resource management in a broadband satellite network[J]. 3G Mobile Communication Technologies, 2000: 392-400
- [24] Koraitim H, Tohme S. Resource allocation and connection ad-

mission control in satellite networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1999, 17(2):360-372

- [25] Inzerilli T, Paone E, Pietrabissa A, et al. QoS support for interactive communication with DVB-RCS satellites[C]// *Computers and Communications, Proceedings (ISCC)*, 2004, 2:897-902
- [26] Acar G, Rosenberg C. Performance study of end-to-end resource management in ATM geostationary satellite networks[C]// *Military Communications Conference*, 2001, 2:764-769
- [27] Omari A, Seco-Granados G, Vazquez-Castro M A, et al. Analysis of the Efficiency and Delay of Bandwidth Request Algorithms in DVB-RCS[C]// *Satellite and Space Communications International Workshop on*, Sept. 2006:165-169
- [28] Chisci L, Fantacci R, Pecorella T. Predictive Bandwidth Control for GEO Satellite Networks [C] // *Proc. IEEE International Conf. Communication (ICC2004)*, 2004
- [29] Mitchell P D, Grace D, Tozer T C. Burst targeted demand assignment multiple-access for broadband internet service delivery over geostationary satellite[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(3):546-558
- [30] Chiti F, Fantacci R, Marangoni F. Advanced dynamic resource allocation schemes for satellite systems[C]// *Communications, ICC 2005*, 2005, 3:1469-1472
- [31] Koutsakis P. Predictive Resource Reservation Access for Multimedia Integration over GEO Satellite Networks[C]// *Proceedings of the Third International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC'07)*, 2007
- [32] Omari A, Seco-Granados G, Vazquez-Castro M A, et al. Analysis of the Efficiency and Delay of Bandwidth Request Algorithms in DVB-RCS[C]// *Satellite and Space Communications International Workshop on*, Sept. 2006:165-169
- [33] Chisci L, Fantacci R, Pecorella T. Dynamic bandwidth allocation in GEO satellite networks: A predictive control approach [J]. *Control Engineering Practice*, 14(9):1057-1067
- [34] Priscoli F D, Pietrabissa A. Resource management for ATM-based geostationary satellite networks with on-board processing [J]. *Computer Networks*, 2002, 39(1):43-60
- [35] Priscoli F D, Pietrabissa A. Design of a bandwidth-on-demand (BoD) protocol for satellite networks modelled as time-delay systems[J]. *Automatica*, 2004(40):729-741
- [36] Pietrabissa A. A multi - model reference control approach for

bandwidth-on-demand protocols in satellite networks[J]. *Control Engineering Practice*, 2008(16):847-860

- [37] Petraki D K, Anastasopoulos M P, Panagopoulos A D, et al. Dynamic Resource Calculation Algorithm in MF-TDMA Satellite Networks[C]// *Mobile and Wireless Communications Summit*, 16th IST, July 2007:1-5
- [38] Park Jung-Min, Savagaonkar U, Chong E K P, et al. Allocation of QoS connections in MF-TDMA satellite systems: a two-phase approach [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, 54(1):177-190
- [39] Panagopoulos A D, Kanellopoulos J D. On the rain attenuation dynamics: spatial -temporal analysis of rainfall rate and fade duration statistics[J]. *Int. J. Sat Commun. and Netw.*, 2003:595-611
- [40] Yi Qian, Hu R, Abu-Amara H, et al. Performance evaluations on a bandwidth on demand algorithm for a high capacity multimedia satellite network[C]// *Communications, ICC 2000*, 2000, 1:139-143
- [41] Chai Wei Koong, Karaliopoulos M, Pavlou G. Scheduling for proportional differentiated service provision in geostationary bandwidth on demand satellite networks[C]// *IEEE Globecom*, 2005:3722-3727
- [42] Lee Ki-Dong, Chang Kun-Nyeong. A real-time algorithm for timeslot assignment in multirate return channels of interactive satellite multimedia networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(3):518-528
- [43] Jiang Z, Leung V C M. A Predictive demand assignment multiple access protocol for Internet access for broadband satellite networks[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2003, 21(4/5):451-467
- [44] Lee Ki-Dong, Cho Y-H, Lee H J, et al. Optimal scheduling for timeslot assignment in MF-TDMA broadband satellite communications[C]// *Proc. IEEE VTC Fall, Vancouver, Canada*, 2002:1560-1564
- [45] Qin Yong, Zhang Jun, Zhang Tao, et al. A practical method for improving delay performance of timeslot allocation in DVB-RCS [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009(22):174-183
- [46] IEEE802. 16 IEEE Standards for Local and Metropolitan Area Networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems[S]. 2004

(上接第18页)

- [38] Nardi B, Whittaker S, Isaacs E, et al. Integrating communication and information through contactMap[J]. *Communications of the ACM*, 2002, 45(4):89-95
- [39] Wattenberg M. Visual exploration of multivariate graphs[C]// *Proceedings of CHI*, 2006:811-819
- [40] Auber D, Chiricota Y, Jourdan F, et al. Multiscale visualization of small world networks[C]// *Proceedings of InfoVis*, 2003:75-81
- [41] Archambault D, Munzner T, Auber D. Grouse: Feature-based, steerable graph hierarchy exploration[C]// *Proceedings of Eurographics*, 2007:67-74
- [42] Herman I, Melançon G, Marshall S. Graph visualization and navigation in information visualization: a survey [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2000, 6(1):24-43
- [43] Sarkar M, Brown M. Graphical fisheye views [J]. *Communications of the ACM*, 1994, 37:73-83
- [44] Ball T, Eick S. Software visualization in the large [J]. *IEEE*

Computer, 1996, 29(4):33-43

- [45] Bier E A, Stone M C, Pier K, et al. Toolglass and magic lenses: The see-through interface[C]// *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1993:73-80
- [46] Phan D, Xiao Ling, Yeh R, et al. Flow map layout [C]// *Proceedings of InfoVis*, 2005:219-224
- [47] Henry N, Fekete J-D. MatrixExplorer: a dual - representation system to explore social networks[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2006, 12(5):677-684
- [48] Henry N, Fekete J-D, McGuffin M. NodeTrix: A hybrid visualization of social networks[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, 13(6):1302-1309
- [49] Frishman Y, Tal A. Online dynamic graph drawing[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2008, 14(4):727-740
- [50] Kapler T, Wright W. GeoTime information visualization[C]// *Proceedings of InfoVis*, 2004:25-32