

## 宽带卫星Mesh网多址接入信道预测分配方案研究

李斗 王峰 姬冰辉 项海格

(北京大学信息科学技术学院电子学系 北京 100871)

**摘要:** 该文针对具有网状(Mesh)拓扑结构的宽带卫星通信网,研究了分布式控制多址接入信道分配策略。提出了一种基于自相似业务流量混沌预测的混合动态分配方案。利用OPNET软件建立了仿真系统,研究比较了信道分配周期、信道负载以及业务流自相似程度对几种方案性能的影响。仿真结果表明,对于采用地球同步轨道(GEO)卫星、低轨(LEO)和中轨(MEO)卫星星座的宽带卫星Mesh网,所提出方案在高信道负载条件下都具有明显的优势。

**关键词:** 宽带卫星Mesh网; 动态分配多址接入; 分布式控制; 自相似业务流; 混沌预测

中图分类号: TN927+.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0763-05

## The Predictive Multi-access Channel Allocation Scheme in Broadband Satellite Mesh Network

Li Dou Wang Feng Ji Bing-hui Xiang Hai-ge

(School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** This paper investigates the distributed allocation control of multi-access channel in broadband satellite mesh network. A novel combined Dynamic Allocation Multi-Access (DAMA) scheme is proposed, which is based on the chaotic prediction of self-similar traffic. The OPNET simulation system is built for comparing the performance of several schemes under different channel allocation cycle and channel load. The influence of traffic with different degree of self-similarity is also studied. Simulation results indicate that the novel scheme has better performance under high channel load in broadband satellite Mesh network with GEO, LEO and MEO satellite constellations.

**Key words:** Broadband satellite mesh network; DAMA; Distributed control; Self-similar traffic; Chaotic prediction

### 1 引言

宽带卫星通信能够提供高速Internet接入及交互式多媒体业务,近年来成为卫星通信的一个重要应用领域<sup>[1]</sup>。现在发展中的宽带卫星通信系统,除采用传统的地球同步轨道(GEO)卫星外,还采用了低轨(LEO)、中轨(MEO)以及混合卫星星座<sup>[2]</sup>。

GEO卫星位于地球赤道上空35,786km的地球同步轨道上,3颗GEO卫星就可以实现全球覆盖,因而多路广播的理想选择。但路径传输时延长达240-280ms,不适于实时业务。LEO卫星的轨道高度在500-1500km范围内,运转周期为90-120min,通常需要几十甚至上百颗卫星才能实现全球覆盖。采用LEO卫星需考虑切换问题,并要依赖于星际链路(ISL)来增加覆盖面积,因而卫星需要具有星上处理(OBP)、星上交换(OBS)及星上路由(OBR)的功能,系统设计较复杂。但LEO卫星的路径传输时延短,一般在6-70ms范围内<sup>[3]</sup>,特别适合于提供实时业务,并且易于实现用户终端的小型化。MEO卫星兼顾了GEO卫星和LEO卫星的优点,其轨道高度在5000-12000km范围内,运转周期为4-6h,实现全球覆盖

一般需要位于2-3个轨道平面上的10-20颗MEO卫星,典型的传输路径时延为110-130ms<sup>[4]</sup>。

本文针对具有网状拓扑结构(Mesh)的宽带卫星通信网,研究了多址接入信道的分布式控制分配策略。网络的基本组成如图1所示,空间段可以选择具有OBP, OBS和OBR功能的LEO, MEO卫星星座或GEO卫星,地面段采用无中心的组网方式,由多个相同的卫星用户地球站构成。每个用户站可以连接多个用户,并可以作为信关站与地面公用网络(例如

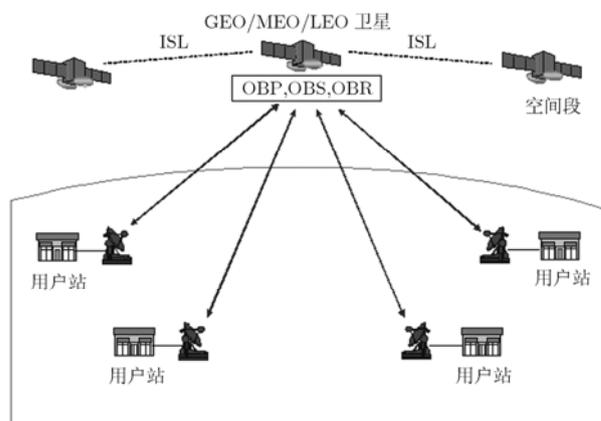


图1 宽带卫星Mesh网的基本构成

2006-10-19 收到, 2007-04-19 改回

国家 863 计划(2006AA01Z278)资助课题

Internet)互联。整个网络能够支持用户站之间点到点、一点对多点、多点对一点以及多点对多点的通信。

下面第2节中介绍了本文研究比较的3种混合动态分配多址接入方案,第3节简述了自相似业务流量的混沌预测算法,在第4节中利用OPNET软件建立了仿真系统,第5节对各种方案在不同仿真条件下的性能进行了比较和分析,第6节是结束语。

## 2 多址接入信道的分配方案

卫星通信网络中多址接入信道的分配策略是影响服务质量(QoS)的关键因素。动态按需分配能够根据各用户站的需求,实时地调整接入信道的分配,因而具有较高的资源利用率。可以采用集中或分布式控制方式。

在分布式控制中,用户站的申请信息通过反向多址接入信道传输到卫星,再由前向广播信道发送给所有用户站。每个用户站在接收到其它用户站的申请信息后,按照相同的分配策略控制信道分配。这种方式虽然增加了用户站的复杂度,但效率更高,也更可靠<sup>[5]</sup>,特别适合于具有网状(Mesh)拓扑结构的卫星通信网。

本文中采用了分布式控制方式,对3种混合动态分配方案在宽带卫星Mesh网中的性能进行了研究比较,这3种方案分别为DAMA+RR\_FCA, DAMA+Linear\_Pre\_FCA, DAMA+Chaos\_Pre\_FCA。方案中除了根据用户站的接入数据率进行动态按需分配(DAMA)以外,还采用了不同的策略对剩余信道容量进行分配(FCA)。

在DAMA+RR\_FCA方案中,剩余容量按照Round-Robin规则在各个用户站之间平均分配<sup>[6]</sup>。DAMA+Linear\_Pre\_FCA方案借鉴了文献[5]中所采用的一种局部线性预测设计思想,剩余容量是根据各用户站接入数据率的变化趋势来进行分配的,见式(1):

$$A_k(N+1) = R_k(N) + \frac{\text{Free\_Capacity}}{\sum_{k=1}^K \text{VR}_k(N)} \text{VR}_k(N) \quad (1)$$

其中  $\text{VR}_k(N) = \gamma \cdot \Delta R_k(N) + (1-\gamma)[\Delta R_k(N) - \Delta R_k(N-1)]$ ,  $\Delta R_k(N) = R_k(N) - R_k(N-1)$ 。

式(1)中  $A_k(N+1)$ 表示第k个用户站在第N+1个申请周期内获得的容量,  $R_k(N)$ 是与第k个用户站接入数据率等价的信道容量,  $K$ 表示用户站的数量,  $\text{VR}_k(N)$ 则反应了第k个用户站接入数据率的动态变化趋势。式中  $\gamma$ 等于剩余容量(free capacity)与总信道容量的比值,  $0 \leq \gamma \leq 1$ 。另外当  $\text{VR}_k(N) < 0$ 时,设定  $\text{VR}_k(N) = 0$ 。

在本文所提出的基于混沌预测的DAMA+Chaos\_Pre\_FCA方案中,剩余容量的分配以各用户站所预测的第N+1周期内的接入数据率  $\text{PR}_k(N+1)$ 为权重,见式(2):

$$A_k(N+1) = R_k(N) + \frac{\text{Free\_Capacity}}{\sum_{k=1}^K \text{PR}_k(N+1)} \text{PR}_k(N+1) \quad (2)$$

下面介绍本文所采用的基于Lyapunov指数的混沌预测算法。

## 3 自相似业务流的混沌预测

自Leland等人发现了以太网中业务流的自相似特征以来<sup>[7]</sup>,通信网络中的自相似现象受到了普遍的关注,特别是自相似业务流的长程相关和重尾分布特性对网络性能的影响。近年来人们也发现了基于分组交换的卫星通信网中业务流的自相似特征,因此一些研究人员已经开始关注卫星通信网络中自相似业务流量的预测问题<sup>[5, 8, 9]</sup>。

传统的预测方法是先建立时间序列的主观模型,再根据模型进行预测<sup>[10]</sup>。应用混沌理论进行预测,可以直接根据时间序列本身所具有的客观规律,避免了人为主观性,提高了预测的精度和可信度。本文利用混沌预测的方法来预测自相似业务流,其有效性已经得到证实<sup>[11]</sup>。

混沌预测的基础是相空间重构理论。假设观察到的时间序列为  $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ ,可以将它重构成一个  $m$ 维相空间中的  $N-(m-1)\tau$ 个相点,其中第  $i$ 个相点为

$$\mathbf{X}_i = \{x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}\}, i = 1, 2, \dots, N - (m-1)\tau \quad (3)$$

这里  $m$ 称为嵌入维数,  $\tau$ 称为时间延迟。 $m$ 和  $\tau$ 的选取非常重要,直接影响着描述混沌吸引子特征的不变量的准确度,进而影响混沌预测的效果。本文依据嵌入时间窗口不变的概念<sup>[12]</sup>,在选择相空间重构参数时设定  $m=2$ ,通过调整  $\tau$ 的取值来优化预测方案的性能,这种方式简化了相空间重构参数的选取过程。

在基于Lyapunov指数的混沌预测算法中,计算Lyapunov指数是实现预测的关键。这里采用了文献[13]中提出的一种轨道跟踪算法,其特点是所需计算量和占用存储空间较小,适合于实时预测。

在完成相空间重构并得到Lyapunov指数之后,本文利用了Lyapunov指数的定义来进行预测:已知相空间中的最后一个相点为  $\mathbf{X}_{N-(m-1)\tau} = \{x_{N-(m-1)\tau}, x_{N-(m-2)\tau}, \dots, x_N\}$ ,它经过一步演化之后变为  $\mathbf{X}_{N+1-(m-1)\tau} = \{x_{N+1-(m-1)\tau}, x_{N+1-(m-2)\tau}, \dots, x_{N+1}\}$ 。现在寻找  $\mathbf{X}_{N-(m-1)\tau}$ 的最近邻点  $\mathbf{X}_{\text{Near}}$ ,  $\mathbf{X}_{\text{Near}}$ 经过一步的演化之后变为  $\mathbf{X}_{\text{Near}+1}$ 。根据Lyapunov指数的定义,有

$$\frac{\|\mathbf{X}_{N+1-(m-1)\tau} - \mathbf{X}_{\text{Near}+1}\|}{\|\mathbf{X}_{N-(m-1)\tau} - \mathbf{X}_{\text{Near}}\|} = e^{\text{LE}} \quad (4)$$

上式中LE表示Lyapunov指数。式(4)中只有相点  $\mathbf{X}_{N+1-(m-1)\tau}$ 的最后一个延迟坐标元素  $x_{N+1}$ 是未知量,通过求解就可以得到第  $N+1$ 时刻的预测值  $x_{N+1}$ ,即第  $N+1$ 个信道分配周期内用户站接入数据率的预测值  $\text{PR}_k(N+1)$ 。

## 4 仿真系统设计

本文利用OPNET网络仿真软件建立了仿真系统,采用了无中心的网状拓扑结构,用户站数目设置为8个。下面分别介绍仿真系统中多址接入信道的MF-TDMA帧结构、信道

分配周期、以及用户站的构成模块。

### 4.1 MF-TDMA 帧结构

MF-TDMA 多址接入方式以其高效灵活性及用户终端设备成本低廉等优势, 越来越广泛地应用于宽带卫星通信网中<sup>[1]</sup>。仿真系统中的 MF-TDMA 帧结构参考了文献[6, 9], 设定每个时隙内包含一个 ATM 信元(53bytes)。根据表 1 中的参数设置可知, 仿真系统的总容量为 1.024Mbps, 每个用户站可以获得的容量为 16kbps 至 256kbps。

表 1 仿真系统中 MF-TDMA 帧参数设置

帧周期	26.5ms
载波数	4
时隙数/载波	16
每时隙容量	16kbps
每载波容量	256kbps

### 4.2 信道分配周期

仿真中采用了 3 种信道分配周期 ( $T_{RA}$ ):

(1)  $T_{RA} = 265\text{ms}$ , 相当于采用 GEO 卫星时的典型端到端路径传输时延, 即每传输 10 个数据帧重新申请分配一次信道容量;

(2)  $T_{RA} = 106\text{ms}$ , 相当于采用 MEO 卫星星座时的典型端到端路径传输时延, 即每传输 4 个数据帧重新申请分配一次信道容量;

(3)  $T_{RA} = 26.5\text{ms}$ , 相当于采用 LEO 卫星星座时的典型端到端路径传输时延, 即每传输一个数据帧就重新申请分配一次信道容量。

### 4.3 用户站构成

仿真系统中用户站的结构如图 2 所示。图中业务源模拟来自多个用户的自相似聚合业务流。本文采用了一种由 Ryu 等人提出的 RPG 自相似业务模型<sup>[14]</sup>。这种模型由多个独立同分布的 ON-OFF 过程构成, ON 和 OFF 的持续时间满足下述具有重尾分布特性的概率密度函数:

$$p(x) = \begin{cases} \gamma A^{-1} e^{-\gamma x/A}, & 0 \leq x \leq A \\ \gamma e^{-\gamma} A^{\gamma} x^{-(\gamma+1)}, & x > A \end{cases} \quad (5)$$

RPG 模型包括 4 个可以设置的参数: 反映业务流自相似程度的 Hurst 参数  $H(0.5 < H < 1)$ , 业务源输出速率  $\lambda$ , 分形起始时间尺度  $T_0$  和源占空比 SAR。它们共同决定了式(5)中参数  $\gamma$  和  $A$  的取值。仿真中设定  $T_0 = 0.001$  和  $\text{SAR} = 50\%$ , 通过改变模型的参数  $H$  和输出速率  $\lambda$  来调整业务流的自相似

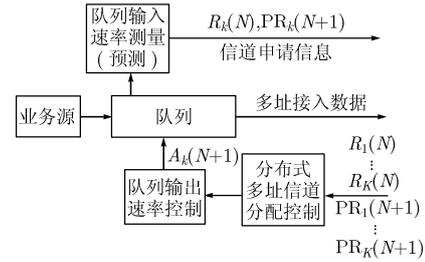


图 2 仿真系统中用户站的结构

程度及多址接入信道的负载。

图 2 中队列(假设足够长, 不存在溢出问题)存放业务源输出数据, 等待进入卫星多址接入信道。队列输入速率测量(预测)模块实时测量第  $N$  个信道分配周期内的队列输入数据率  $R_k(N)$ , 在采用 DAMA+Chaos\_Pre\_FCA 方案时, 还要预测第  $N+1$  个周期内的队列输入数据率  $\text{PR}_k(N+1)$ 。用户站发出的申请信息中包含了测量及预测结果。

申请信息通过反向多址接入信道传送到卫星上, 再通过前向广播信道发送给所有用户站。每个用户站在接收到所有用户站的申请信息后, 再按照相同的分配策略, 计算出本站可以获得的接入信道容量  $A_k(N+1)$ , 并通过队列输出速率控制模块动态调整队列输出数据率, 即该站的多址接入数据率。

## 5 仿真内容及结果分析

下面对 3 种多址接入信道混合动态分配方案在不同信道分配周期和信道负载条件下, 以及当业务流的自相似程度发生变化时的性能进行了比较。

### 5.1 信道分配周期的影响

这里首先研究了信道分配周期的影响。仿真时设定业务源的  $H=0.85$ , 调整业务源的输出速率使多址接入信道的负载为 80%。在进行混沌相空间重构时, 经过优化选择的重构参数分别为  $m=2, \tau=20$  对应  $T_{RA} = 265\text{ms}$ ;  $m=2, \tau=10$  对应  $T_{RA} = 106\text{ms}$ ;  $m=2, \tau=14$  对应  $T_{RA} = 26.5\text{ms}$ 。

表 2 对采用 3 种分配方案的用户站平均队列时延进行了比较, 其中“比较 1”是 DAMA+Chaos\_Pre\_FCA 方案相对于 DAMA+Linear\_Pre\_FCA 方案的性能提高百分比, “比较 2”是 DAMA+Chaos\_Pre\_FCA 方案相对于 DAMA+RR\_FCA 方案的性能提高百分比。

仿真结果表明: 信道分配周期会对各种方案的性能产生影响, 本文所提出的 DAMA+Chaos\_Pre\_FCA 方案在不同信道分配周期下都具有优势, 并且当  $T_{RA} = 26.5\text{ms}$  时优势

表 2 在不同信道分配周期下采用 3 种方案的用户站平均队列时延比较(单位: s)

$T_{RA}(\text{ms})$	DAMA +Chaos_Pre_FCA	DAMA+Linear_Pre_FCA	DAMA +RR_FCA	比较 1(%)	比较 2(%)
26.5	0.471	0.635	0.642	25.8	26.6
106	0.507	0.613	0.557	17.3	8.98
265	0.592	0.725	0.629	18.3	5.88

更为明显,说明该方案更适用于路径传输时延较短的LEO卫星通信网。

### 5.2 信道负载的影响

设定GEO卫星系统的平均路径传输时延为265ms, MEO卫星系统的平均路径传输时延为106ms, LEO卫星系统的平均路径传输时延为26.5ms。图3中比较了不同卫星星座及信道负载条件下,采用3种分配方案的数据传输平均端到端时延。这里虽然忽略了MEO和LEO卫星系统中路径传输时延的动态变化,但也可以从一个侧面直观地反映GEO, MEO和LEO宽带卫星通信网的性能。

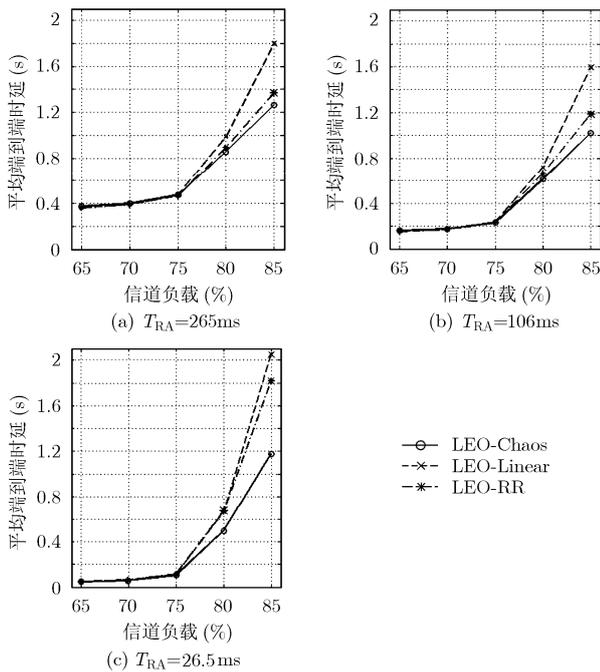


图3 在不同卫星星座及信道负载条件下采用3种方案的平均端到端时延比较

由图3中的仿真曲线可以得出以下几个结论:  
在GEO, MEO和LEO卫星通信系统中,随着多址接入

信道负载的增加,也就是信道中实际传输的数据流量越来越接近多址接入信道的容量,3种方案的平均端到端时延都逐渐增大。

在低信道负载条件下3种方案的性能差异不大,采用局部线性预测的DAMA +Linear\_Pre\_FCA方案略有优势。当信道负载超过75%时,本文提出的基于混沌预测的DAMA +Chaos\_Pre\_FCA方案的优势越来越显著;此时DAMA+Linear\_Pre\_FCA方案因不能及时反映业务流的突发变化,性能不如其他两种方案;DAMA +RR\_FCA方案的性能居中,由于它的算法简单,也具有一定的优势。

在低信道负载条件下,随着 $T_{RA}$ 的减小,3种方案的性能都逐渐改善,即LEO卫星系统的平均端到端时延最小。当信道负载超过80%时,情况则发生了变化,此时 $T_{RA}=106ms$ 的用户站平均队列时延最小。这说明在高信道负载条件下,当业务流自相似程度较高( $H=0.85$ )时,LEO卫星系统需要自适应地调整信道分配周期,以获得最佳的性能。

### 5.3 业务流自相似程度的影响

本文最后研究了业务流自相似程度的影响。设定信道分配周期 $T_{RA}=26.5ms$ ,保持信道负载为75%,通过调整业务源的 $H$ 参数来改变业务流的自相似程度。图4给出了采用DAMA+Chaos\_Pre\_FCA方案时,业务源输出数据率、用户站队列时延和队列时延累积分布(CDF)曲线的比较。采用其它两种方案的仿真结果类似。

业务源 $H$ 参数( $0.5 < H < 1.0$ )的取值越大,其输出业务流的自相似程度就越高。从图4(a)中可以看到,随着 $H$ 参数的增大,源输出速率的突发变化程度随之增大,对应图4(b)中的用户站队列时延的动态变化程度也增大。用户站队列时延的累积分布曲线上升得越快,说明时延变化范围越小,时延抖动也就越小。从图4(c)中可以看到, $H=0.70$ 时用户站队列时延的累积分布曲线上升最快,而 $H=0.85$ 时用户站队列时延的累积分布曲线上升最慢。这从另一个角度说明了业务流自相似程度对网络性能的影响。

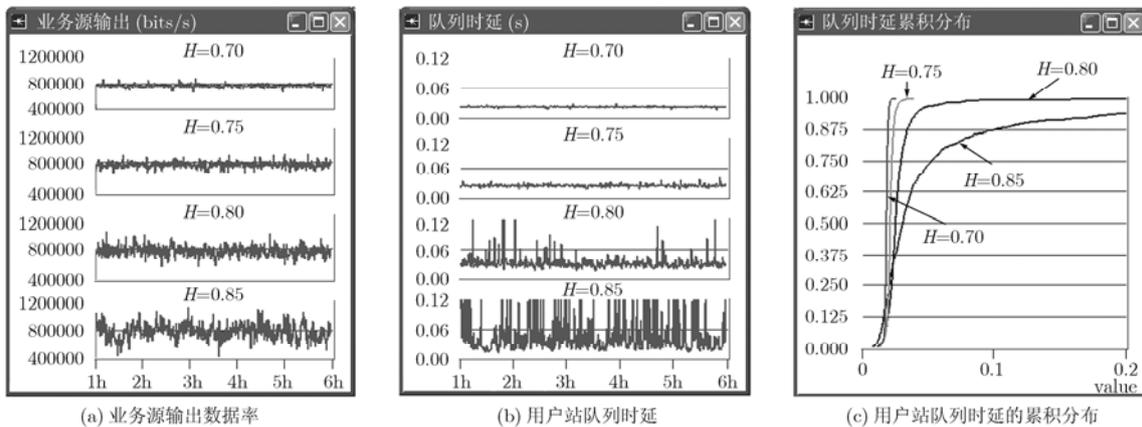


图4 业务流自相似程度对DAMA+Chaos\_Pre\_FCA方案性能的影响( $T_{RA}=26.5ms$ )

## 6 结束语

本文针对具有网状拓扑结构的宽带卫星通信网, 研究了多址接入信道的分布式控制动态分配策略, 提出了一种基于自相似业务流量混沌预测的混合动态按需分配方案。本文还利用OPNET软件建立了仿真系统, 研究比较了几种方案在不同应用条件下的性能。仿真结果表明, 对于采用GEO卫星、以及LEO和MEO卫星星座的宽带卫星Mesh网, 所提出方案在高信道负载条件下都具有明显的优势。

下一步的工作是建立LEO和MEO卫星星座仿真模型, 研究路径时延变化对多址接入信道分配方案的影响, 以及优化选择信道分配周期的自适应算法。同时考虑利用跨层设计(cross-layer design)的概念<sup>[15]</sup>, 更有效地分配信道资源, 提高资源利用率。

## 参 考 文 献

- [1] Kota S. Broadband satellite networks: trends and challenges. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, New Orleans, LA USA, 2005, 3: 1472-1478.
  - [2] Farserotu J and Prasad R. A survey of future broadband multimedia satellite system-issues and trends. *IEEE Communication Magazine*, 2000, 38(6): 128-133.
  - [3] Chotikapong Y, Cruickshank H, and Sun Z L. Evaluation of TCP and Internet traffic via low Earth orbit satellites. *IEEE Personal Communications*, 2001, 8(3): 28-34.
  - [4] Akyildiz I F and Jeong S H. Satellite ATM networks: a survey. *IEEE Communications Magazine*, 1997, 35(7): 30-43.
  - [5] Jiang Z F and Leung V C M. A predictive demand assignment multiple access protocol for Internet access over broadband satellite networks. *International Journal of Satellite Communication Network*, Wiley InterScience, 2003, 21: 451-467.
  - [6] Iuoras N and Tho Le-ngoc. Dynamic capacity allocation for quality-of-service support in IP-based satellite networks. *IEEE Wireless Communications*, 2005, 12(5): 14-20.
  - [7] Leland W E, Taqqu M S, and Willinger W, *et al.* On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version). *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1994, 2(1): 1-15.
  - [8] Mitchell P D, Grace D, and Tozer T C. Burst targeted demand assignment multiple-access for broadband Internet service delivery over geostationary satellite. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(3): 546-558.
  - [9] Chiti F, Fantacci R, and Tarchi D, *et al.* QoS provisioning in GEO satellite with onboard processing using predictor algorithms. *IEEE Wireless Communications*, 2005, 12(5): 21-27.
  - [10] Sang A and Li S. A predictability analysis of network traffic. *Computer Networks(Formerly known as Computer Networks and ISDN Systems)*, 2002, 39(4): 329-345.
  - [11] Hasegawa M, Wu G, and Mizuno M. Applications of nonlinear prediction methods to the Internet traffic. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Sydney, Australia, 2001(3): 169-172.
  - [12] Kugiumtzis D. State space reconstruction parameters in the analysis of chaotic time series- the role of the time window length. *Physica D*, 1996, 95(1): 13-28.
  - [13] 杨绍清, 章新华, 赵长安. 一种最大李雅普诺指数估计的稳健算法. *物理学报*, 2000, 49(4): 636-640.  
Yang S Q, Hang X H, and Zhao C A. A robust method for estimating the largest Lyapunov exponent. *Acat Physica Sinica*, 2000, 49(4): 636-640.
  - [14] Ryu B and Lowen S. Fractal traffic models for internet simulation. *Proceedings of ISCC 2000, Fifth IEEE Symposium on Computers and Communications*, Antibes-Juan Les Pins, France, 3-6 July, 2000: 200-206.
  - [15] Pandya J, Narula-Tam A, Yao H, and Wysocarski J. Network layer performance of a satellite network with dynamic link-layer resource allocation. *International Journal of Satellite Communication Network*, 2007, 25: 217-235.
- 李斗: 女, 1967年生, 副教授, 在职博士生, 研究兴趣为卫星通信网络中的资源管理。
- 王峰: 男, 1981年生, 硕士生, 研究兴趣为混沌理论在通信系统中的应用。
- 姬冰辉: 女, 1981年生, 硕士, 研究兴趣为通信网中自相似业务流的建模及预测。
- 项海格: 男, 1941年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 中国通信学会会士, 主要研究领域为数字通信理论与系统。