

基于混沌预测的宽带DVB-RCS卫星接入信道动态分配方案研究

李斗 姬冰辉 王峰 项海格
(北京大学信息科学技术学院电子学系 北京 100871)

摘要: 该文概述了基于卫星数字视频广播-反向信道系统(DVB-RCS)标准的宽带卫星通信网的特点,并重点研究了多址接入信道的动态分配策略,在利用混沌理论对网络中的自相似业务流量进行预测的基础上,提出了一种新型混合按需分配多址接入方案。该文还利用OPNET软件建立了仿真系统,用于比较不同方案的性能。仿真结果表明,在高信道负载以及网络中业务流具有较高自相似程度的条件下,该文所提出方案具有更优越的性能。

关键词: 宽带卫星通信; 数字视频广播-反向信道系统; 按需分配多址接入; 混沌预测; 自相似业务

中图分类号: TN927+.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)03-0607-05

The Dynamic Allocation of Broadband DVB-RCS Satellite Access Channel Based on Chaotic Prediction

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

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

Abstract: This paper provides an overview of broadband satellite communication networks based on Digital Video Broadcasting-Return Channel System (DVB-RCS) standard, with an emphasis on the dynamic allocation of multi-access channel. A novel combined Demand Assignment Multiple Access (DAMA) scheme is proposed, in which chaotic prediction method is employed for self-similar traffic. For comparing the performance of different schemes, OPNET software is used to build a simulation system. Simulation results indicate that the novel scheme has better performance under heavy channel load and when the traffic has high degree of self-similarity.

Key words: Broadband satellite communication; DVB-RCS; DAMA; Chaotic prediction; Self-similar traffic

1 引言

卫星数字视频广播业务(DVB-S)目前已在世界范围内得到了成功而广泛的应用。随着因特网(INTERNET)的飞速发展,人们开始考虑利用这些传输平台提供高速因特网接入和交互式多媒体业务。由于DVB-S系统只提供了单向卫星广播信道,因此欧洲电信标准化协会(ETSI)在2000年发布了卫星数字视频广播-反向信道系统(DVB-RCS)标准^[1]。

基于DVB-RCS标准的宽带卫星通信网通常包括一颗或多颗地球同步轨道(GEO)卫星、一个网络控制中心(NCC)、信关站(gateway)、以及多个反向信道卫星终端(RCST),其基本结构如图1所示。网络控制中心负责全网的资源分配和交换控制等。信关站是卫星网与地面因特网或其它公用网络的接口。反向信道卫星终端(以下简称用户站)一般服务于多个用户,要求支持IP协议,并可以作为路由器或交换节点接入本地局域网。

多址接入信道的分配策略是影响宽带卫星通信网服务质量(QoS)的关键因素^[2],因此成为本文研究的重点。下面第2节中介绍了DVB-RCS标准中的几种接入信道申请分配方式,提出了一种基于自相似业务流量混沌预测的新型混合动

态按需分配方案;第3节描述了本文所采用的自相似业务流量混沌预测算法;第4节中利用OPNET软件建立了仿真系统;第5节中将本文所提出方案与其它方案进行了比较,给出了仿真结果和分析;第6节是结束语。

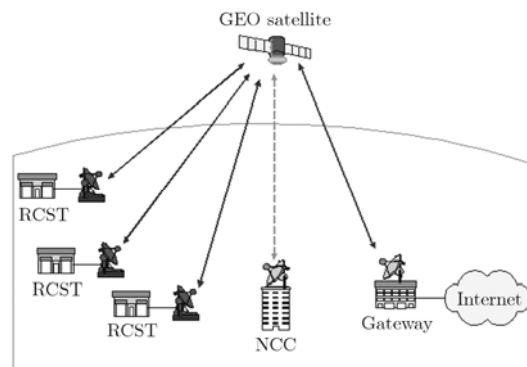


图1 基于DVB-RCS标准的宽带卫星通信网

2 混合多址接入信道分配方案

DVB-RCS标准中规定多址接入信道采用MF-TDMA方式及ATM数据帧结构,为了支持宽带业务,用户站的接入数据率最高可达2Mbps。标准中定义了5种基本的接入信道申请分配方式^[3]:持续速率分配(CRA)、基于速率的动态容量(RBDC)申请、基于容积的动态容量(VBDC)申请、绝对

基于容积的动态容量 (AVBDC) 申请和剩余容量分配 (FCA)。

CRA在5种方式中的优先级最高,属于固定分配方式,适合于传输速率相对稳定的业务。RBDC的优先级仅次于CRA,属于动态按需分配方案,需要各用户站根据本站的业务接入数据率定期向多址接入控制单元申请信道。RBDC的信道分配可以根据各用户站接入数据率的变换进行动态调整,因而信道利用率高于CRA方式。VBDC和AVBDC的功能类似,同样属于动态按需分配方式,但用户站是根据所需传输文件的大小申请信道容量,且优先级低于RBDC。FCA的优先级最低,由多址接入控制单元用于分配系统内剩余的容量,无需用户站申请。这几种方式可以相互结合,以适应不同业务的需求。

自从Leland等人发现了以太网中业务流的自相似特征以来^[4],已经证实自相似业务流广泛地存在于各类分组交换网络中^[5],近年来人们在研究宽带卫星通信网时也多采用了自相似业务模型^[6-8]。由于GEO卫星通信网的端到端路径传输时延(RTT)长达240-280ms,导致多址接入信道的申请分配周期远远超过地面网络,在此期间网络中的自相似业务流量会发生很大变化,因此预测问题开始受到关注^[7]。

本文将DVB-RCS标准中的RBDC与FCA方式结合,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信道分配方案。具体方法是:在每个信道申请分配周期内,多址接入控制单元首先根据各用户站的实时接入数据率进行按需分配,再以各用户站所预测的下一个周期内的接入数据率为权重分配剩余容量。因此第 k 个用户站在第 $N+1$ 个周期内获得的容量为

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

式(1)中 $R_k(N)$ 是与第 k 个用户站在第 N 个周期内的实时接入数据率等价的容量, $\text{PR}_k(N+1)$ 为第 k 个用户站所预测的第 $N+1$ 个周期内的接入数据率, K 为用户站的数量。

为了说明本方案的性能,本文对以下3种方案进行了比较:

(1) RBDC + 实时速率权重FCA(比较方案1,下文表示为S1_WT_FCA)

(2) RBDC + 平均FCA(比较方案2,下文表示为S2_RR_FCA)

(3) RBDC + 预测速率权重FCA(本文提出,下文表示为S3_Chaos_FCA)

这3种方案中RBDC的分配方式相同,区别在于FCA的分配策略。在比较方案1中,剩余容量的分配以各用户站的实时接入数据率为权重;比较方案2参考了文献[8]中所采用的方式,将剩余容量按照Round-Robin规则在各个用户站之间平均分配。

在比较以上3种方案之前,首先介绍本文用于自相似业

务流量预测的混沌算法。

3 自相似业务流量的混沌预测

自相似是与分形和混沌理论密切相关的一个概念,人们已经开始将混沌理论应用于自相似业务流的特性分析和建模研究^[9]。基于Lyapunov指数的混沌预测方法,在电力和水利等非线性动力学系统的短期预报中有着成功的应用,本文采用这种方法对自相似业务流的传输速率变化趋势进行预测,下面介绍具体的预测方法。

3.1 相空间重构

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

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

这里 m 称为嵌入维数, τ 称为时间延迟。 m 和 τ 的选取十分重要,直接影响混沌预测的效果。

对于这两个参数的选取目前存在两种观点:一种观点认为两者是互不相关的,即 m 和 τ 可以独立选取。另一种则认为两者的选择存在着很强的关联性,并引入了嵌入时间窗口 $\tau_w = (m-1)\tau$ 的定义^[10],指出在相空间重构过程中 τ_w 的取值是保持不变的,而 m 和 τ 则可以相对调整。

本文依据嵌入时间窗口不变的概念,在相空间重构时设定 $m=2$,通过调整 τ 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。

3.2 计算Lyapunov指数

计算Lyapunov指数是实现混沌预测的关键,本文采用了文献[11]中给出的一种轨线跟踪算法,其特点是所需计算量和存储空间较小,适合于实时在线预测。

首先寻找重构相空间中相点 \mathbf{X}_i 的最近邻点 $\mathbf{X}_{i\text{Near}}$,满足:

$$\|\mathbf{X}_{i\text{Near}} - \mathbf{X}_i\| = \min_j \|\mathbf{X}_j - \mathbf{X}_i\| \quad (3)$$

约束条件是 $(m-1)\tau < |j-i| < \alpha \cdot (m-1)\tau$,其中 $1 < \alpha < 10$ 。这个条件保证了两个邻近点位于不同的轨线上,且具有一定的相关性,减少了搜索时间和计算量,节省了存储空间。式中 $\|\mathbf{X}_j - \mathbf{X}_i\|$ 表示相点 \mathbf{X}_j 和 \mathbf{X}_i 之间的欧几里德距离。

相点 \mathbf{X}_i 在其最大扩展方向上的Lyapunov指数为

$$\text{LE}(i) = \max_h \left\{ \frac{1}{h\Delta t} \log \frac{\|\mathbf{X}_{i\text{Near}+h} - \mathbf{X}_{i+h}\|}{\|\mathbf{X}_{i\text{Near}} - \mathbf{X}_i\|} \right\} \quad (4)$$

这里要求 $1 < h < \beta(m-1)\tau$,其中 $0 < \beta < 1$,以保证演变后的相点与原相点位于同一轨线上;同时要求 $\mathbf{X}_{i\text{Near}+jh}$ 、 \mathbf{X}_{i+jh} 与 $\mathbf{X}_{i\text{Near}}$ 、 \mathbf{X}_i 之间的方向夹角足够小。式(4)中 Δt 为时间序列的采样时间间隔。

最后利用式(5)计算平均Lyapunov指数,其中 M 为相空间内相点的数量。

$$\text{LE} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \text{LE}(i) \quad (5)$$

3.3 混沌预测模式

下面利用 Lyapunov 指数的定义来实现预测。假设时间序列为 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, 重构相空间的维数为 m , 延迟时间为 τ 。该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}_{Near} , \mathbf{X}_{Near} 经过一步演化之后变为 \mathbf{X}_{Near+1} 。因为 Lyapunov 指数为向空间中一步演化的指数增长率, 即

$$\frac{\|\mathbf{X}_{N+1-(m-1)\tau} - \mathbf{X}_{N-(m-1)\tau}\|}{\|\mathbf{X}_{Near+1} - \mathbf{X}_{Near}\|} = e^{LE} \quad (6)$$

式(6)中只有 $\mathbf{X}_{N+1-(m-1)\tau}$ 的最后一个延迟坐标元素 x_{N+1} 是未知量, 由此可以求解出 x_{N+1} , 即利用时间序列的前 N 个样点 x_1, x_2, \dots, x_N , 来预测第 $N+1$ 个样点 x_{N+1} 的取值。

4 仿真系统建模

本文利用 OPNET 软件建立的仿真系统采用了星型拓扑结构, 包括一个 GEO 卫星、一个网控中心与信关站合一的中心站、32 个用户站。集中式多址接入控制单元放在中心站, 信道申请分配周期等于两倍的 RTT, 仿真时设为 530ms。下面介绍仿真系统中多址接入信道的 MF-TDMA 帧格式、用户站结构、以及所采用的自相似业务模型。

4.1 MF-TDMA 帧格式

仿真系统中 MF-TDMA 帧结构的设置参考了文献[7]和文献[8]。根据 DVB-RCS 标准, 每个时隙内包含一个 ATM 信元(cell), 即 53 字节的数据。由表 1 中的参数设置可知, 仿真系统的总容量为 $16 \times 32 \times 8 = 4096 \text{ kbps}$, 用户站可以获得的容量为 $16 \text{ kbps} - 512 \text{ kbps}$ 。当然实际系统的容量会更高, 但本文结论具有指导意义。

表 1 仿真系统中 MF-TDMA 帧格式

帧周期	26.5ms
载波数	8
时隙数/载波	32
每时隙容量	16kbps
每载波容量	512kbps

4.2 用户站结构

仿真系统中用户站结构如图 2 所示。图中业务源模拟产生来自不同用户的聚合业务流。队列(假设足够长, 不存在溢出问题)存放业务源的输出数据, 等待进入卫星反向多址接入信道。队列输入速率测量模块负责实时测量第 N 个申请分配周期内队列输入数据率。在采用本文所提出的方案时, 用户站还需要通过预测模块对第 $N+1$ 个周期内队列的输入数据率, 即业务源的输出数据率 $PR_k(N+1)$ 进行预测。

用户站的信道申请信息通过反向多址接入信道传递到中心站多址接入控制单元。经过一个信道申请分配周期后, 用户站通过卫星前向广播信道接收信道分配信息。队列输出

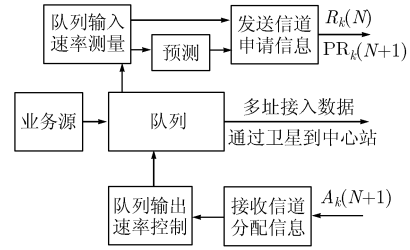


图 2 仿真系统中用户站结构

速率控制模块根据所获得的信道容量 $A_k(N+1)$, 动态地调整队列的输出数据率。

4.3 自相似业务模型

本文中用户站的业务源采用了由 Ryu 等人提出的一种 PowOn-PowOFF 自相似业务模型^[12]。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:

$$p(x) = \begin{cases} \gamma A^{-1} e^{-\gamma x/A}, & 0 \leq x \leq A \\ \gamma e^{-\gamma} A^\gamma x^{-(\gamma+1)}, & x > A \end{cases} \quad (7)$$

PowOn-PowOFF 模型有 4 个可调参数: 反映输出业务流自相似程度的 Hurst 参数 $H(0.5 < H < 1)$, 输出速率 λ , 分形起始时间尺度 T_0 和源占空比 SAR。它们与式(7)中参数 γ 和 A 具有如下关系:

$$\left. \begin{aligned} H &= (3 - \gamma)/2 \\ \lambda &= RM/2 \\ T_0^{2-\gamma} &= \gamma^{-1}(2 - \gamma)(3 - \gamma)[(\gamma - 1)e^\gamma + 1]R^{-1}A^{-1-\gamma} \\ SAR &= 1 - 2^{-M} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中 M 表示 ON-OFF 过程的个数, R 为 ON 期间的平均输出速率。仿真中设定模型的参数 $T_0 = 0.001$ 和 $SAR = 50\%$, 通过调整输出速率 λ 来改变多址接入信道的负载。

下面介绍具体的仿真研究内容, 以及结果和分析。

5 仿真内容及结果分析

这里首先以数据传输的平均端到端时延作为 QoS 评价指标, 研究在不同信道负载条件下, 改变自相似业务模型 H 参数时各方案的性能。

图 3 中上面的一组 3 条曲线对应 $H=0.85$ 的仿真结果, 下面一组 3 条曲线对应 $H=0.75$ 的结果。可见随着信道负载的增加, 3 种方案的平均端到端时延都逐渐增大。同时 H 参数对各方案的性能影响较大, $H=0.85$ 时的平均端到端时延明显大于 $H=0.75$ 时的, 并且随着信道负载的增加差距逐渐增大。本文所提出的 S3_Chaos_FCA 方案在 $H=0.85$ 时一直保持着优势; 而在 $H=0.75$ 时, 只有当信道负载超过 70% 以后才具有优势, 并且随着信道负载的增加优势越来越明显。

H 参数是描述业务流自相似程度的重要参数, H 的取值越接近 1, 说明业务流的自相似程度就越高。由此可以得出结论: 在高信道负载以及业务流自相似程度较高的情况下, 本文所

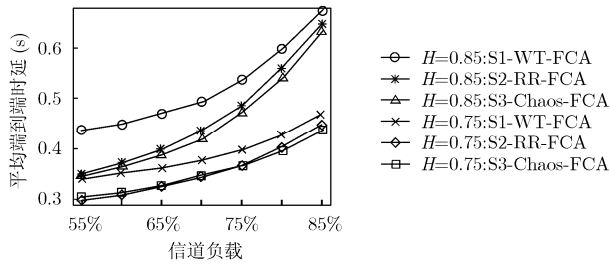


图3 不同信道负载下的平均端到端时延比较

提出方案的性能优于其它两种方案。这是因为当业务流的自相似程度较高时,用户站的数据接入速率在短时间内会发生急剧变化。以实时速率为权重的S1_WT_FCA方案,因不能反映业务流的突发变化而性能最差;不过随着信道负载的增加, FCA所占比重逐渐减小,它与其它两种方案的性能差距也逐渐减小。本文所提出的以预测速率为权重的S3_Chaos_FCA方案,能够根据业务流的变化趋势,预先分配信道,因而性能最优。基于Round Robin规则的S2_RR_FCA方案,当业务流自相似程度较高且信道负载较高时,由于不能将信道容量及时分配给需求最大的用户站,因而性能不如本文提出的方案。

图4显示了采用S3_Chaos_FCA方案时,某用户站队列输入/输出数据率和队列时延变化规律。此时的信道负载为90%, $H=0.8$ 。队列输入数据率反映了本站用户的接入业务流量的变化,而队列输出数据率等价于分配给该用户站的信道容量。两条曲线的变化趋势基本相同,说明分配给该用户站的信道容量能够满足用户需求。另外当业务流量出现较大的突发变化时,队列时延也会明显增大。图中虚线所指处的最大队列时延为0.68s,而平均队列时延测得为0.36s。

本文进一步研究了自相似业务模型 H 参数对用户站队列长度的影响。设定信道负载为90%,图5给出了 H 参数取不同值时某用户站队列长度的累积分布(CDF)曲线。可见随着 H 参数的增大,队列长度也逐渐增长。测量得到 $H=0.7$ 时的最大队列长度为50cells, $H=0.75$ 时的最大队列长度为107cells,而 $H=0.8$ 时的最大队列长度则达到350cells。以上结果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。

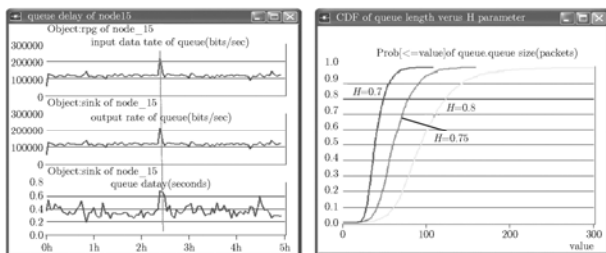


图4 用户站队列输入/输出速率和时延变化

图5 H 参数取不同值时用户站队列长度的累积分布

本文最后还研究了信道申请分配周期(T_{RA})对各方案性能的影响。表2和图6给出了用户站平均队列时延随着 T_{RA} 变化的测量结果和对比曲线,此时信道负载为70%, $H=0.85$ 。这里 $T_{RA}=26.5\text{ms}$ 和 $T_{RA}=106\text{ms}$ 分别可以在低、中轨道卫星通信网中采用; $T_{RA}=530\text{ms}$ 对应本文所研究的GEO卫星通信网采用地面集中控制的情况;而 $T_{RA}=265\text{ms}$ 则对应GEO卫星通信网采用星上处理(OBP)集中控制信道分配的方式。

从表2中第5行与S2_RR_FCA的比较来看,本文所提出S3_Chaos_FCA方案在不同信道申请分配周期下都具有优势。同时随着 T_{RA} 的减小,采用各种方案的用户站平均队列时延也明显减小,加上低轨和中轨卫星网的路径传输时延远小于GEO卫星网,因此更适于提供实时业务。另外采用OBP控制接入信道的分配也能显著地提高GEO卫星通信网中各方案的性能。由于本文方案的预测在用户站完成,可以通过OBP方式实现。表2给出的相空间重构参数说明混沌预测算法的计算量不大,有利于实现在线预测。

表2 不同信道申请分配周期下用户站平均队列时延比较(s)

T_{RA}	26.5ms	106ms	265ms	530ms
S1_WT_FCA	0.0164	0.0594	0.1286	0.2280
S2_RR_FCA	0.0168	0.0511	0.1016	0.1705
S3_Chaos_FCA	0.0153	0.0467	0.0927	0.1561
S3对比S2提高百分比	8.88%	8.598%	8.748%	8.468%
相空间重构参数 m, τ	2, 4	2, 4	2, 4	2, 3

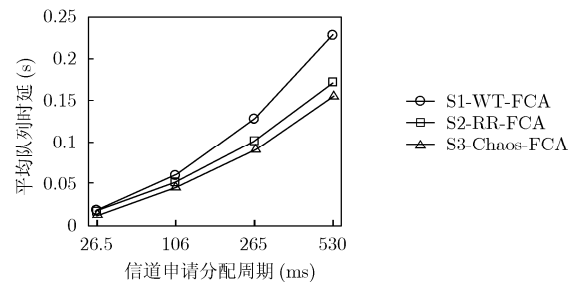


图6 不同信道申请分配周期下的用户站平均队列时延

6 结束语

本文概述了基于DVB-RCS标准的宽带卫星通信网的主要特点,并重点研究了多址接入信道的分配问题,提出了一种新型混合动态按需分配多址接入方案,在该方案中利用混沌预测算法对自相似业务流量进行了预测。文中还利用OPNET软件建立了仿真系统,并将所提出方案与其它方案进行了比较。结果表明,在高信道负载以及网络中的业务流自相似性程度较高的条件下,本文所提出的分配方案具有更优越的性能。仿真结果还证明了本文方案同样适用于采用OBP控制的GEO卫星、以及低轨和中轨卫星通信网。

在保障QoS的前提下,如何提高卫星通信网中宝贵的信

道资源的利用率, 一直以来都是一个非常严峻的问题。下一步的工作包括: 进一步优化混沌预测算法, 同时考虑将该算法应用到其它类型的卫星通信网络中。另外还要研究宽带卫星通信网中的区分业务服务, 针对不同QoS等级采取不同的信道分配策略, 以提高资源利用率。

参考文献

- [1] Neale J, Green R, and Landovskis A. Interactive channel for multimedia satellite networks. *IEEE Communications Magazine*, 2001, 39(3): 192-198.
- [2] Kota S and Marchese M. Quality of service for satellite IP networks: a survey. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2003, 21(4-5): 303-349.
- [3] ETSI. EN 301 790 V1.4.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems (Final draft). France, European Telecommunications Standards Institute and European Broadcasting Union, 2005.
- [4] 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.
- [5] Park K and Willinger W. Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation. New York, John Wiley & Sons, 2000: 1-38.
- [6] Ryu B. Modeling and simulation of broadband satellite networks—Part II: traffic modeling. *IEEE Communications Magazine*, 1999, 37(7): 48-56.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Erramilli A, Roughan M, Veitch D, and Willinger W. Self-similar traffic and network dynamics. *Proceedings of the IEEE*, 2002, 90(5): 800-819.
- [10] 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.
- [11] 杨绍清, 章新华, 赵长安. 一种最大李雅普诺夫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. *Acta Physica Sinica*, 2000, 49(4): 636-640
- [12] 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.*

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。

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。

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。

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。