

Internet 中的相变现象及一种新的相变业务流模型

白 刚, 隆克平, 程时端, 陈俊亮

(北京邮电大学程控交换技术与通信网国家实验室, 北京 100876)

摘 要: 本文从宏观的角度阐述了 Internet 的网络行为和业务流相变现象的特性, 讨论了相变现象的存在对于网络系统的行为和控制带来的影响, 并提出了一种改进的能够真实地反映出汇聚业务流的基本统计物理特征的网络业务流模型, 仿真结果验证了本文提出的改进模型的有效性.

关键词: Internet; 业务流模型; 相变; 临界行为

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2002)02-0194-05

Phase Transition Phenomena in the Internet and a New Phase Transition-Based Traffic Model

BAI Gang, LONG Ke ping, CHENG Shi duan, CHEN Jun liang

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The paper expatiates on network behavior of Internet and the characteristics of the traffic phase transition phenomena from macroscopic viewpoint. The effects on network system behavior and control algorithm arising from the existence of phase transition are also discussed. Finally, an improved network traffic model based on these phase transition phenomena, which can reproduce the basic statistic physical property of aggregated network traffic, is presented. Simulation results validate our improved network traffic model.

Key words: Internet; traffic model; phase transition; critical behavior

1 引言

为了设计高效的流量控制算法, 提高网络的效率, 需要了解真实网络中流量的特性, 尤其是由于过多分组进入网络而导致网络拥塞的行为特征. 但是, 由于 Internet 的异构性和复杂性, 包括各种不同数据链路层和各种不同应用的业务流的共存, 使得对 Internet 行为的完全理解非常困难.

对如此复杂的 Internet 流量进行研究, 通常有微观与宏观两种研究方法. 前者研究网络机制中各个独立的部分. 但是由于叠加的非线性效应, 各个微观机制的简单叠加往往不能与整个网络的复杂行为一致. 宏观方法试图忽略算法的细节, 只研究独立于各个微观算法的网络汇聚行为统计特性, 这非常适合于用来研究 Internet 这样巨大的复杂系统. 但也正是由于它脱离了细节, 这种宏观方法不能直接给出任何实际的控制算法. 因而, 这两种方法需要互补使用, 这对于业务量建模和分析以阐明 Internet 业务流的复杂行为非常重要.

现有的业务流建模研究成果中, Poisson 模型是最为经典的用于表征电话网和 Internet 分组流的短相关模型. 而近期的网络流量测量研究表明网络流量具有自相似特点^[1], 即各个到达分组之间存在长相关. 此时, Poisson 模型已不能真实地反映出网络流量, 尤其是在大时间尺度下的特性了.

已有研究人员从宏观角度^[2-5], 探索采用基于统计物理学的方法阐明 Internet 流量的自相似性, 并引入相变概念用于解释分组流密度和分组回程时间 RTT 的波动变化, 试图解释网络行为的本质特征.

然而, 鉴于这一领域的研究尚处于初步的探索阶段, 已有的研究成果^[4,5]都不能很好地应用相变理论解决网络实际问题, 原因是缺乏真实刻画网络流量特性的模型. 为此, 本文就这一问题进行了深入研究, 并在已有相变理论的基础上, 提出了一种改进的能够较为真实地反映业务流统计特性的网络业务流模型, 文中的仿真结果表明本文提出的改进模型优于目前存在的模型.

2 网络业务流的相变现象

在统计物理学, 相变表现为在临界点上宏观行为属性剧烈变化, 呈现出自相似特性^[6]. 若以从参数(Order Parameter)的变化表征系统状态的迁移, 则该参数取值为零时对应于系统处于某稳定状态; 当系统跃变至另一状态时, 该参数取值会发生由零到非零值的变化. 也就是说, 当控制参数的值小于某一临界值时, 系统处于一个稳定的状态 A, 从参数总为零. 一旦控制参数超过了这个临界值, 从参数就不再为零了. 此时, 系

统的宏观属性将由状态 A 变迁到另一个状态 B, 如图 1 所示. 需要特别指出的是, 在临界点上, 系统的宏观行为呈现出长相关特性, 表现出自相似性. 临界点之外, 系统的宏观行为呈现出短相关特性.

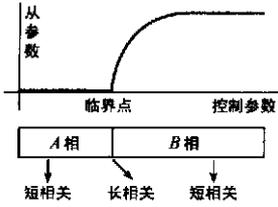


图1 相变现象图解

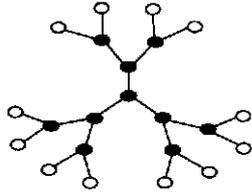


图2 Cayley 树模型

在计算机网络中, 包括广域网、局域网和以太网, 也广泛存在着相变现象^[7]. 网络中分组流密度和 RTT 的波动变化都可以应用相变概念来解释, 流密度波动被称为局域相变, RTT 波动被称为全局相变, 其控制参数分别为平均输入流速率和端到端路径上拥塞的路由器的数目^[8]. 随着控制参数的变化, 分组流密度和 RTT 以及拥塞持续时长的变化会呈现相变现象的特征.

Csabai 和 M. Takayasu 等研究者通过对 RTT 的测量研究, 发现测得的 RTT 数据具有 $1/f$ 噪声波动^[2,3]. 当网络中流量较低时, RTT 序列的功率谱接近于高斯白噪声, 而在中度拥塞的临界状态, 其功率谱具有 $1/f$ 噪声的特征. 而此 $1/f$ 噪声正是源自于拥塞的动态相变的临界行为特性. $1/f$ 噪声表示一个系统的动态特性受过去事件的强烈影响, 它是具有各种尺度和各种持续时间的信号的叠加, 即当一个处于临界状态的动态系统在产生所有各种尺度和所有各种持续时间的连锁反应时所出现的信号, 体现出相关在大时间尺度上的扩展和某种协作效应的存在. 这也在一定程度上解释了网络中的自相似现象.

进一步考虑一个渗流现象 Cayley 树模型, 如图 2 所示. 在图中白点表示网络终端主机, 黑点表示具有转发路由功能的网络设备, 如路由器. 如果把各个结点考虑为绝缘体或导体, 相互用导线连接起来. 边沿的两个结点能够导通的概率, 随着导体所占比例的增加而增加. 显然, 该比例低于一定值时, 导通是不会发生的; 只有达到一定比例, 导通才有可能发生. 这就是所谓的渗流现象.

M. Takayasu 用接触过程 (contact process) 来解释在临界点附近结点拥塞的传播^[3]. 设一个结点若是拥塞的, 会以一定概率 p 变为非拥塞的; 而一个结点若是非拥塞的, 会以一定概率 q 变为拥塞的. 显然若 p 太大, 最终所有结点都是非拥塞的; 而若 q 太大, 最后所有结点都是拥塞的. 当 p 和 q 保持在某一特定值时, 拥塞与非拥塞状态之间的跳变达到动态平衡, 就会发生类似渗流的临界现象.

对应于实际的网络, 当一定数量的用户以某一速率向网络中注入分组业务流时, 若速率较低, 网络不太可能发生拥塞; 当输入速率高到注入网络的分组数量大于离开网络的分组数量时, 网络将变得越来越拥塞. 对应着以上两种状态之间的临界状态应该是网络的最优状态.

网络中流密度的变化, 使得网络在两个相态之间转换. 当流密度较低时, 各个结点产生的业务流被混合, 网络处于稀疏空闲相态; 随着流密度的增大, 各结点将进入交替突发性地发送分组的拥塞相态中. 临界状态处于空闲态和拥塞态之间, 此时的流密度为临界流密度, 对应于临界点.

拥塞持续时长是表征给定时间序列波动的一个重要参数. 运用层次集的间隔分布分析 IDL (Interval Distribution of Level Sets Analysis) 方法对波动的统计行为进行分析, 可以判断出拥塞持续时长的分布. 拥塞持续时长被定义为网络流密度连续大于某阈值的时间长度. 若此波动是自相似的, 对应的分布服从幂率分布 ($\propto L^{-\alpha}$), 各拥塞持续时长具有长相关属性. 此时拥塞的行为特性是近乎独立于此阈值的具体取值的. 这是因为由于尺度不变属性, 该阈值的取值并不会影响到拥塞持续时长分布函数的形状. 可以对此进行如下的简单证明^[8].

已知阈值 $t (u > t)$ 和各突发长度服从幂率分布如下:

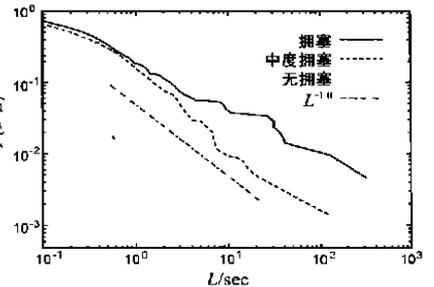
$$P(U > u) \propto u^{-\alpha} \quad (1)$$

假定流密度大于阈值 t , 则该突发长度的条件概率 $P(U > u | U > t)$ 保持如下的函数形式:

$$P(U > u | U > t) \propto (u/t)^{-\alpha} \quad (2)$$

因而, 对于自相似情况, 该函数形式得以保持并且是独立于阈值的不同取值的.

在实际的网络流中, 低密度业务流表现出短相关性, 拥塞持续时长服从指数分布. 随着流密度的增加, 流密度的波动表现出强时间相关性.



在临界点上, 相关长度发散而拥塞持续时长累计概率服从指数为 -1.0 的幂律分布. 理论上, 该分布对应于原始时间序列的 $1/f$ 型功率谱. 当流密度超越临界点而继续加强时, 拥塞持续时长将服从 Plateau 分布. 图 3 示出了根据网络中实测数据分析得到的这几种情况^[7].

3 新的相变业务流模型及其仿真结果

根据对大量网络业务流实测数据的分析, 在相变概念理论的前提下, 文献[8]中提出了一种基于自回归映射函数的汇聚业务流模型, 能够再现网络中相变现象的基本物理统计特性.

该模型的递归生成序列的数学描述如下:

$$X_{n+1} = F(X_n) + \eta_n \quad (3)$$

其中 η_n 为外加的系统随机噪声. 对实测数据进行分析, 可得如图 4 所示的流密度变化演进关系图. 这是在 10Mbps 的以太网上测得的数据. 图中横坐标表示在第 n 个采样时刻的流密度 X_n , 纵坐标表示在第 $n+1$ 个采样时刻的流密度 X_{n+1} , 方形点表示均值, 其上的垂直延展线代表标准差, 虚线为拟合逼近

线, 实线为参照线 $X_{x+1} = X_n$.

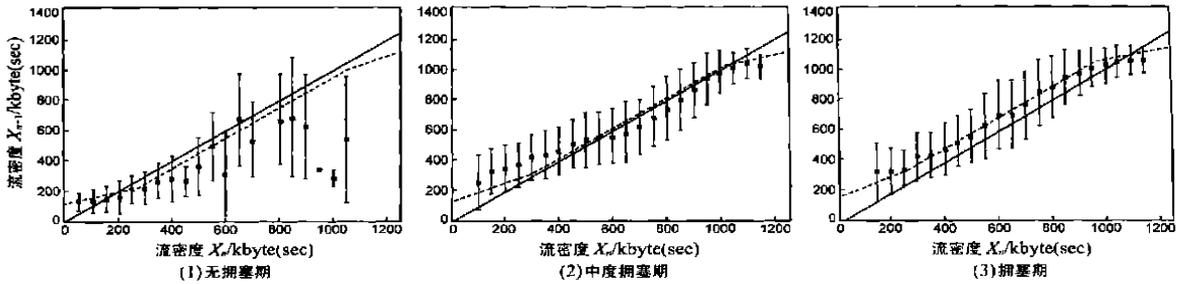


图 4 不同拥塞程度下的流密度演进关系图

$F(X)$ 正是根据这些关系图中的逼近线构造出来的, 表达式如下:

$$F(X) = \begin{cases} a_1 X + b_1, & 0 < X < c_1 \\ X + b, & c_1 < X < c_2 \\ a_2(X - 1.0) + b_2, & c_2 \leq X \leq 1.0 \end{cases} \quad (4)$$

其中: b_1 和 b_2 分别代表逼近线对应的最小和最大流密度; c_1 和 c_2 分别代表逼近线的拐点; a_1 和 a_2 分别代表逼近线两端对应的斜率. 参量为整个系统的控制参数, 对应于真实网络中的输入流密度.

该模型所生成业务流的拥塞持续时长的累计概率密度函数如图 5 所示. 由图可见, 中度拥塞期对应的累计概率密度函数接近虚直线所示的幂率分布, 而无拥塞期和拥塞期的累计概率密度函数分别近似为指数衰减分布和重拖尾的 plateau 分布. 可见该模型表现出的统计属性与前面提及的实际观测到的相变现象是定性一致的. 但是仍存在一些不足之处, 最重要的一点是, 在中度拥塞期, 其累计概率密度函数服从的幂率分布指数为 -0.5 . 这与图 3 所示的实测指数值 -1.0 有相当大的差异.

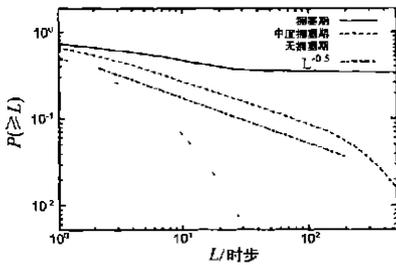


图 5 原模型的拥塞持续时长累计概率分布曲线

经过分析发现, 导致这一偏差的一个重要原因是: 在原有模型中控制参数 b 在不同的拥塞状况(无拥塞、中度拥塞和拥塞), 都取定为固定值. 而在实际网络中, 这一控制参数对应的平均流密度几乎是不可能维持在一个固定值上的. 由于网络中多种业务的流量突发、TCP 流量控制机制的动作以及 Internet 大量用户源节点的汇聚效应等, 都会使网络中的业务负荷强度发生动态变化. 这种波动虽然不一定会导致网络拥塞状况发生大的改变, 但是会引起网络平均流密度一定程度上的时间性波动. 因而 b 取为定值显然是不符合网络实际情况的.

鉴于这一事实, 首先考虑对控制参数 b 加入时间波动噪声 $g(t)$ 令:

$$b = b_0 + g(t) \quad (5)$$

以求构造出更为真实地业务量模型来. 其中为不同拥塞状况下取对应定值的输入参量, 相当于原模型中的 b . $g(t)$ 为反映在宏观拥塞程度基本无变化

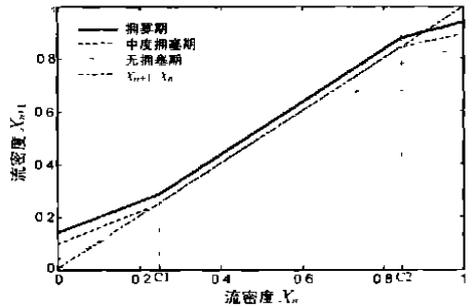


图 6 改进后的逼近线

时业务量特性动态变化的自适应参数, 考虑到网络平均流密度的变化要远比各个样点间流密度的变化速度慢, $g(t)$ 应当是个变化较后者缓慢的波动噪声, 波动幅度也应当相对较小.

此外, 原模型中逼近线的选择也有值得商榷的地方. 原模型中对所有的拥塞情况都设定相同的最大和最小流密度. 而由实测获得的流密度演进关系图, 实际上不难发现, 在无拥塞期处于低流密度的概率很大, 而处于高流密度的概率很小; 而在高拥塞期情况正好相反. 所以, 针对不同的拥塞程度, 设定不同的最大和最小流密度才更为合理. 另外, 由此关系图还可以看出这样的趋势: 图中无拥塞期和高拥塞期的样点分别处于中度拥塞样点的下部和上部. 为反映这一趋势, 无拥塞期和高拥塞期的逼近线应分别处于中度拥塞期逼近线的上方和下方. 综上所述, 重新设计了如图 6 所示的归一化逼近线. 在该图中, 三条折线分别针对不同的拥塞程度, 只设定中度拥塞情况下的最小和最大流密度 b_1 和 b_2 . 而高度拥塞(实线表示)和无拥塞(短虚线表示)时的逼近线实际上是中度拥塞(长虚线表示)时的逼近线垂直平移得到的. 而平移的程度正是由代表平均输入流密度的输入参数来决定的. $b_0 = 0$ 对应中度拥塞的情况. 当 $b_0 > 0$ 时, b_0 越大对应的拥塞程度就越高. 当 $b_0 < 0$ 时, b_0 越小对应的拥塞程度就越低. 这便对应着无拥塞期和高拥塞期的最小和最大流密度分别为 $b_1 + b_0$ 和 $b_2 + b_0$.

另外, 由此根据实测数据得到的逼近线图中可以看出, 系统参数 b_1 和 b_2 分别为 0.1 和 0.9, c_1 和 c_2 分别为 0.25 和 0.85. 这两对参数实际上决定了模型再现低密度和高密度业务流的能力. 一些初步仿真结果证明, 当其取值偏离了上述的

适宜范围时,模型的生成流会与真实业务流产生较大的差异,如低密度业务流或高密度业务流所占比例失真,或是最大、最小流密度与实际情况产生偏差.

就此,给出改进的的自回归模型表达式如下:

$$X_{n+1} = F(X_n) + b_0 + g(t) + \eta_n \quad (6)$$

$$F(X) = \begin{cases} a_1 + b_1, & 0 < X < c_1 \\ X, & c_1 \leq X < c_2 \\ a_2(X - 1.0) + b_2, & c_2 \leq X \leq 1.0 \end{cases} \quad (7)$$

而由函数 $F(X)$ 在拐点 c_1 和 c_2 上的连续性,可得 a_1 和 a_2 的表达式为:

$$a_1 = \frac{c_1 - b_1}{c_1}, a_2 = \frac{b_2 - c_2}{1.0 - c_2} \quad (8)$$

为了验证此改进模型的有效性,我们使用数值计算工具软件 MATLAB 对此模型进行了计算仿真.在仿真中定义改进

模型系统参数 b_0 对应于无拥塞、中度拥塞和高度拥塞的值分别为 $-0.020, 0$ 和 0.015 . 系统随机噪声 η_n 定义为在 $[-0.1, 0.1]$ 区间均匀分布的独立随机变量. 输入参数 b 上叠加的时间波动噪声 $g(t)$ 定义为在 $[-0.01, 0.01]$ 区间均匀分布的独立随机过程,并限定其每隔 150 个仿真时步才产生一次随机波动. 在这些条件下,对各种拥塞情况进行了多次仿真. 本文提出的模型仿真生成的业务流时间序列如图 7 所示. 图中每个时步相当真实网络 0.1 秒,即图中给出了相当于真实网络 500 秒的仿真网络流量. 与文献[8]中给出的实测业务流图形(图 8)相比较可见,在此大时间尺度下,该改进模型能够基本真实地再现各种拥塞程度下的网络流量,包括不同拥塞情况下流密度的时间波动性,高、低密度流量所占比率以及最高、最低流密度的再现性. 而传统 Poisson 模型在这样大的时间尺度上已不能反映出流量密度的时间波动性了[1].

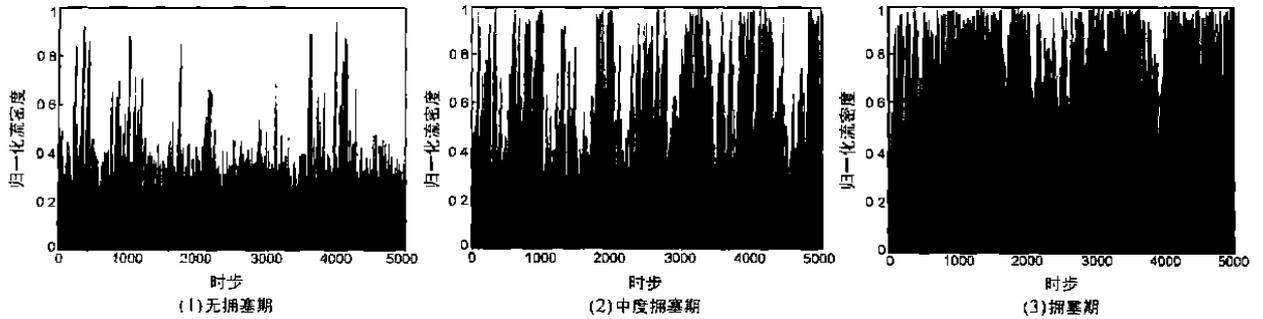


图 7 改进模型生成的业务流

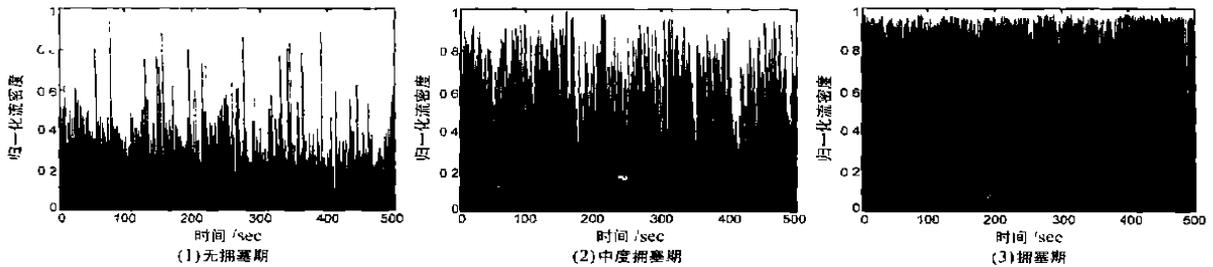


图 8 网络实测的业务流

进一步对仿真生成的数据进行分析,可得图 9 所示的拥塞持续时长累计概率分布曲线. 比较图 9 和图 3 及图 5,可以看出:在更大的时间尺度上,改进模型在各种拥塞状况下的概率分布较原模型更为接近真实情况. 在临界情况下,改进模型的拥塞持续时长

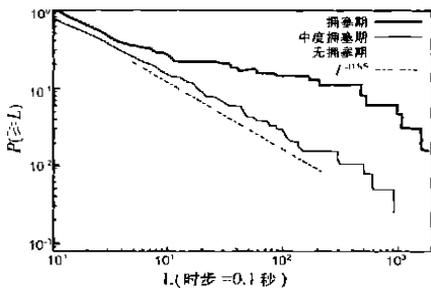


图 9 改进模型的拥塞持续时长累计概率分布

累计概率分布服从指数为 -0.85 的幂率分布,较原模型的幂率指数 -0.5 更接近真实业务流对应的幂率指数 -1.0 ,这表明改进模型的统计特性更逼近真实情况. 同时,无拥塞期和拥塞期的累计概率密度函数仍分别为指数衰减分布和重拖尾的 Plateau 分布,与实测流密度对应的分布情况吻合得很好. 由此可见本文提出的改进模型的有效性和真实性都优于原有模型.

4 结论与展望

当今的因特网是一个庞大的复杂系统. 要对这样的网络进行建模和真实有效的仿真,难度是非常大的. 因而,探究本质上的不变性和规律性就显得尤为重要. 统计研究发现,计算机网络中存在着广泛的幂律现象,最近的研究将相变的概念

用来解释这一现象,运用相变理论来阐释网络表现出的宏观行为特性.本文对 Internet 中存在的相变现象进行了探讨,并基于此提出了一种能够反映网络流量统计物理特性的网络业务流改进模型.对于这一领域的研究有重要的指导作用.

将相变理论引入计算机网络是一个处于新兴阶段的研究方向,因而在很多方面还需要探索研究.已有研究者把对网络中相变现象的研究进一步拓展,从网络动力学的角度研究网络的动态最佳状态——自组织临界状态^[9].由此可见,本文所涉及的研究内容不仅有助于网络中的幂律和拥塞机理的解释,而且对什么是网络最优状态的深入理解也非常有益.

参考文献:

- [1] V Paxson, S Floyd. Wide area traffic: The failure of poisson modeling [J]. IEEE/ACM Trans. Net., 1995, 3(3): 226- 244.
- [2] I Csabai. 1/f Noise in computer network traffic [J]. Journal of Physics A: Math. Gen., 1994, 27: L417- 419.
- [3] M Takayasu, et al. Critical behaviors and 1/f noise in information traffic [J]. Physica A, 1996, 233: 824- 834.
- [4] A Y Tretyakov, et al. Phase transition in a computer network model [J]. Physica A, 1998, 253: 315- 322.
- [5] T Ohira, R Sawatani. Phase transition in a computer network traffic model [J]. Physical Review E, 1998, 58: 193- 195.
- [6] H E Stanley. Introduction to Phase Transition and Critical Phenomena [M]. Oxford University Press, New York, 1971.

- [7] K Fukuda, et al. Origin of critical behavior in ethernet traffic [J]. Physica A, 2000, 287: 289- 301.
- [8] K Fukuda. A study on phase transition phenomena in internet traffic [D]. Ph. D thesis. Keio University, 1999.
- [9] 袁坚. 计算机网络中的相变和自组织临界现象 [R]. 博士后出站研究报告. 北京: 清华大学, 2000 年.

作者简介:



白 刚 男. 1973 年生于陕西省. 于 1996 年在西安电子科技大学计算机系获学士学位, 同年保送至北京邮电大学国家重点实验室攻读硕士学位. 1998 年转为直接攻读博士学位. 主要研究方向为宽带通信网.



隆克平 男. 1968 年生于四川省通江县. 于 1998 年在电子科技大学获博士学位, 同年到北京邮电大学做博士后研究. 现为北京邮电大学国家重点实验室教授. 主要研究方向为宽带通信网性能分析、IP QoS 机制及 TCP/IP 协议改进. 发表论文 50 余篇.