

## 用户行为统计特性对通信网络性能可靠性的影响

赵娟<sup>1,2</sup>, 郭平<sup>1</sup>, 邓宏钟<sup>2</sup>, 吴俊<sup>2</sup>, 谭跃进<sup>2</sup>, 张敏<sup>1</sup>

(1. 中国人民解放军后勤工程学院 网管中心, 重庆 401311; 2. 国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 针对二维方格网络模型, 对用户访问网络资源过程中呈现的幂律特性和集聚特性进行了建模, 借助网络相变分析了用户访问行为的统计特性对网络性能可靠性带来的影响。研究表明, 用户访问资源节点形成的二分网络的度分布的幂律特性对网络性能可靠性的影响较小, 但这种二分网络中具有高访问量的资源节点子集的频繁衍变会改善网络的性能可靠性; 用户访问行为的集聚特性中突发性访问的强度、频率和持续时间在一定程度上影响着网络性能可靠性的相变行为; 随着突发性访问与正常性访问时间单元之间活动用户数量比值的增大, 网络性能可靠性的相变点逐渐右移, 即网络更加能够容忍高强度的突发性访问。

**关键词:** 网络可靠性; 用户行为; 相变; 集聚性; 幂律分布

中图分类号: TN913.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)01-0043-08

## Impact of user behavior on network performance reliability

ZHAO Juan<sup>1,2</sup>, GUO Ping<sup>1</sup>, DENG Hong-zhong<sup>2</sup>, WU Jun<sup>2</sup>, TAN Yue-jin<sup>2</sup>, ZHANG Min<sup>1</sup>

(1. Center of Network Management Logistical Engineering University, PLA, Chongqing 401311, China;

2. College of Information Systems and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Based on a lattice network, a user access behavior model was established to describe the statistical characteristics of user behavior including the clustering characteristics and the power law distribution. The phase transition point was used to analysis the influence of the statistical characteristics of user behavior on the network performance reliability. It was shown that the network performance reliability almost independent on the degree distribution of the server-visited bipartite network; however the hot changing of the small subset with the high degree server nodes improved the network reliability. The strength, frequency and the duration of the clustering characteristics have certain impact on the phase transition of network performance reliability. The phase transition point of network performance reliability moved to the right with the increase of the difference between the number of active users when the clustering characteristics happened and don't.

**Key words:** network reliability; user behavior; phase transition; clustering characteristics; power-law distribution

### 1 引言

随着计算机和通信技术的发展, 人类生产和生活对网络的依赖性逐渐增强, 使得通信网络成为了重要的信息基础设施, 保证通信网络可靠运行的研究工作就突显重要。在实际中, 通信网络很少发生显著的连通性故障, 但时延增加、吞吐量下降、分组丢失率增大等网络性能下降的情况却是时常发

生, 这就引发了网络性能可靠性的研究<sup>[1-4]</sup>。影响网络性能可靠性的因素大致概括为 3 个层面: 一是设备层面, 即组成网络的交换机、终端及链路设备的硬件性能等; 二是网络层面, 包括网络的拓扑结构和体系结构、路由和管理控制方面的通信策略和协议、网络应用的服务能力和健壮性等; 三是行为层面, 即用户访问网络的时空行为、流量行为、需求行为等。

收稿日期: 2011-09-27; 修回日期: 2012-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70771111, 60904065, 71031007)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (7077 11, 60904065, 71031007)

目前,针对第一、二方面开展的研究工作较多<sup>[5-7]</sup>,而围绕第三方面的研究工作还相对较少。近年来,大量实证研究<sup>[8-15]</sup>表明用户访问网络资源的过程呈现出幂律分布、集聚现象等统计特征,并对流量波动、数据分组、队列长度等网络性能参数产生了重要影响。

与有线网络相比,对无线网络用户的不确定性和移动性等行为特征的研究更有助于网络的重新布局和配置,因此目前国外文献主要关注无线网络中用户访问行为的研究。Balachandran 等<sup>[8]</sup>在 2001 年 ACM 国际会议会场的无线局域网中,采集了 195 名用户在 3 天会议期间访问网络的流量,从用户接入网络的位置、用户会话连接时间、会话占用的带宽、访问的应用类别、用户移动性等方面实证分析了用户访问行为,这为无线局域网布局的优化提供数据参考。Schwab<sup>[9]</sup>和 Kotz<sup>[10]</sup>在更大网络规模和更多用户的网络环境中,实证分析了校园无线网络中用户访问网络的行为特征。Tang<sup>[11]</sup>实证研究了某城域无线网络中用户访问行为。

马卫东等<sup>[12,13]</sup>从时域统计的角度实证研究了用户对网页访问的二分网络的幂律分布特性,并将具有高幂律特征的小子集节点进行分布式映射,即将访问频度较高的小部分网站资源进行分布式存储,方便用户对资源就近取材,进而改善网络性能。蔡青松等<sup>[14]</sup>实证研究发现用户访问流媒体资源过程中呈现出明显的访问集聚性、时间相关性等。但目前少有关于用户访问行为的统计特性如何影响网络性能可靠性的研究。因此,本文将在作者建立的网络流量模型和性能可靠性测度的基础上,借助网络相变研究用户行为的幂律特性和集聚性对网络性能可靠性的影响。

## 2 二维方格网络模型

通信网络的节点可以分为 3 类:一是资源节点,是网络数据的提供者;二是路由节点,是网络数据的传输者;三是用户节点,是网络数据的使用者。资源节点和用户节点负责数据的发送和接收,而路由节点承担数据的转发。

通信网络的拓扑模型如图 1 所示。选取  $N \times N$  的方格网络作为通信网络中传输子网的拓扑模型,记为  $L_{N \times N}$ ,其中,该方格网络的边界节点作为传输

子网的接入层,内部节点构成核心层和汇聚层; $U$  为用户节点的集合, $NU$  是  $U$  集合的节点数目, $S$  为资源节点的集合, $NS$  是  $S$  集合的节点数目。

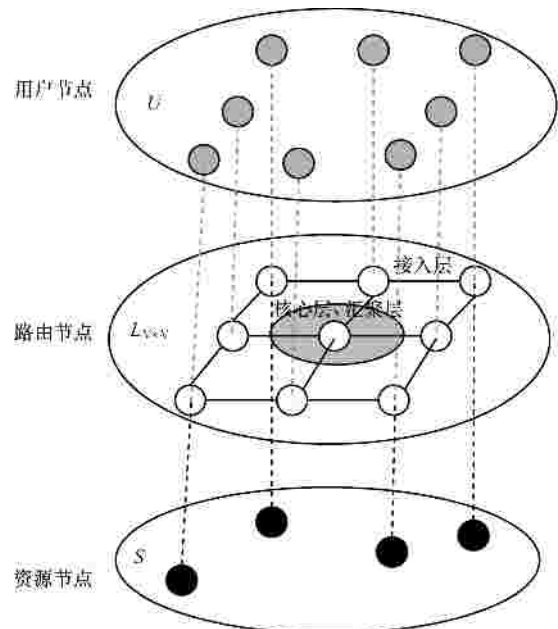


图 1 通信网络拓扑模型

通信网络的流量模型如下:1)在  $[t-1, t]$  单位时步内,用户节点  $u_i$  选取资源节点  $s_j$  为目的节点,以恒定速率产生数据分组;2)在第  $t$  时步,  $u_i$  和  $s_j$  之间数据分组的传输路径是根据网络在第  $t-1$  时步的负载情况以及在  $[t-1, t]$  单位时步内加载的数据流情况而选择的一条时延最短路径  $P_{ij}(t)$ ;3)在  $[t-1, t]$  单位时步中,用户的数据流以随机的顺序被加载到网络中;4)数据分组到达路由节点时,已经有数据分组在等待转发,新到达的数据分组将排在队列的末尾;5)假定不考虑设备的硬件故障或磨损,则路由节点的数据分组转发能力是固定不变且有限的,由出厂状态决定,即每一时步内,路由节点  $v_k$  只能转发  $C_k$  个数据分组。

本文关注的性能可靠性是指网络在 QoS 约束的条件下完成传输任务的质量水平。因此,以  $u_i$  和  $s_j$  之间数据分组传输时延和分组丢失率为变量,建立表征网络两端性能可靠性的评估指标。第  $t$  时步,路由节点  $v_k$  转发数据分组的时延  $D_k(t)$  及分组丢失率  $L_k(t)$  与节点负载  $W_k(t)$  的关系分别为

$$D_k(t) = \begin{cases} d_k, & W_k(t) \leq C_k \\ d_k \times \left( \frac{W_k(t)}{C_k} \right)^a, & W_k(t) > C_k \end{cases} \quad (1)$$

$$L_k(t) = \begin{cases} l_k, & W_k(t) \leq C_k \\ l_k \times \left(\frac{W_k(t)}{C_k}\right)^\beta, & W_k(t) > C_k \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $d_k, l_k$  分别为当路由节点负载小于其转发容量时转发数据分组的时延和分组丢失率, 由出厂状态决定, 不随时间发生变化。  $\alpha, \beta > 0$ , 是队列长度对数据分组性能的影响因子。

用户节点  $u_i$  对传输子网的时延和分组丢失率记为  $D_i, L_i$ , 则第  $t$  时步,  $u_i$  和  $s_j$  之间数据分组传输的性能可靠性为

$$\begin{cases} Delay\_R_{ij}(t) = \prod_{k=1, v_k \in P_{ij}(t)}^l e^{-l \times f_k(t)} \\ Loss\_R_{ij}(t) = \prod_{k=1, v_k \in P_{ij}(t)}^l e^{-l \times g_k(t)} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $P_{ij}(t) = \{u_i, v_1, \dots, v_k, \dots, v_l, s_j\}$  是第  $t$  时步,  $u_i$  和  $s_j$  之间数据分组的传输路径;  $l > 0$ , 是关联参数, 反映路径中各节点与其上游节点的关联性;  $f_k(t), g_k(t)$  是路径  $P_{ij}(t)$  的性能与用户要求的差异程度, 即网络传输数据分组的质量水平, 分别为

$$\begin{cases} f_k(t) = \frac{\sum_{s=1, v_s \in P_{ij}(t)}^k D_s(t)}{D_i} \\ g_k(t) = \frac{\prod_{s=1, v_s \in P_{ij}(t)}^k L_s(t)}{L_i} \end{cases} \quad (4)$$

关于流量模型的详细描述可参见文献[15]。

### 3 用户行为的统计特性模型

本节主要对用户访问行为在时空域上呈现的集聚性和幂律分布特性进行建模。

用户行为的集聚性是关注用户在时间上出现的访问突发性。实际网络中, 当舆论热点出现时, 用户将会“蜂拥式”地访问网络, 网络中具有访问行为的用户节点 (也称为活动用户) 数量将急剧增加, 网络流量呈现突发性的增长。

以  $T$  为仿真时间,  $\Delta T$  为时间单元, 刻画用户行为的集聚特性的模型如下: 1) 每个活动用户的发送分组速率均为  $r$ ; 2) 在正常性访问的时间单元  $\Delta T$  内, 活动用户比例为  $\mu$ ; 3) 在突发性访问的时间单元  $\Delta T$  内, 活动用户的比例增加  $\mu + \mu^?$ ,  $0 < \mu^? < 1$ 。则注入网络的流量速率为

$$f(\Delta T) = \begin{cases} r \times NU \times (m + w), & s(\Delta T) = 1 \\ r \times NU \times m, & s(\Delta T) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $s(\Delta T) = 1$  表示时间单元  $\Delta T$  内具有突发性访问,  $s(\Delta T) = 0$  表示  $\Delta T$  内具有正常性访问。  $\Delta T$  内活动用户的数量记为  $NU_{\Delta T} = NU \times (\mu + \mu^? \times s(\Delta T))$ , 构成的活动用户集合记为  $U_{\Delta T}$ 。

由式(5)可知, 网络流量是由参数  $r, \mu, \mu^?, s(\Delta T)$  决定, 用户行为的集聚特性主要由  $s(\Delta T)$  来体现。实际中, 用户突发性访问的发生是不确定的, 而本文关注集聚特性的强度对网络性能可靠性的影响, 因此在不影响研究结果的前提下, 假设用户行为的集聚特性呈周期性的变化。在  $[0, T]$  上,  $s(\Delta T)$  表示为周期性的序列  $SQ(H, \mu^?)$ ,  $H$  为突发性访问事件发生的周期, 即相邻的两次突发性访问事件发生间隔的时间单元  $\Delta T$  的数量;  $\mu^?$  是突发性访问事件发生的持续时间, 即是信号  $s(\Delta T) = 1$  持续的时间单元  $\Delta T$  的数量。参数  $H$  和  $\mu^?$  决定了用户行为的集聚特性的强度。

用户行为的幂律特性是关注用户访问资源节点形成的二分网络的度分布的幂律特征。大量实证研究发现用户对网络资源的访问呈现幂律特性, 文献[16]通过对清华大学校园网流量的统计发现, 网络中 10% 的资源节点吸引了 80% 用户的访问。也就是说, 每个资源节点成为目的节点的概率是不等的, 往往是一小部分资源节点会成为用户访问的热门节点。这种对网络资源访问的偏向性, 使得以用户节点  $U$  和资源节点  $S$  为节点集合, 以访问关系为边构成的二分网络  $B_{U,S}$  的度分布将具有幂律特性。

假定每个活动用户在  $\Delta T$  时间单元内只选择一个资源节点为目的节点, 且不改变, 则用户访问行为的幂律特性就由  $\Delta T$  单元内的二分网络  $B_{U,S}(\Delta T)$  中资源节点  $S$  的度分布来刻画。在 Chung 等提出的扩展随机网络模型<sup>[17]</sup>的基础上, 构建网络  $B_{U,S}(\Delta T)$  的过程如下。

- 1) 初始网络: 给定两类节点, 资源节点为  $S$ , 活动用户集合为  $U_{\Delta T}$ , 记  $U^* = U_{\Delta T}$ 。
- 2) 给定度序列<sup>[18]</sup>,  $DS = \{d_1, d_2, \dots, d_{NS}\}$ ,  $d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_{NS}$ , 其中,  $d_j = c \times j^{-1/(2-1)}$ ,  $? > 2$ , 最小度  $d_{NS} = m$ , 最大度  $d_1 = c = m \times NS^{1/(2-1)}$ 。
- 3) 度序列  $DS$  的数值随机地分配给  $S$  中的节点。
- 4) 对于资源节点  $s_j$ , 其度数为  $k_j$ , 在  $U^*$  中随机地选择  $k_j$  个不同用户, 并产生连接边, 且记  $k_j$  个用户组成的集合为  $U_j$ 。

5) 更新集合  $U^*$ ,  $U^*=U^*-U_j$ , 重复第 4) 步操作, 直至  $U^*$  为空集。

上述二分网络的构造算法中, 涉及  $m$  和  $\gamma$  2 个未知参数, 它们如何取值呢? 首先讨论  $\gamma$  的取值。根据秩分布和度分布的数学关系<sup>[19]</sup>, 可得度序列  $DS$  的度分布函数为

$$p(d) = (g-1)m^{g-1}d^{-g} \quad (6)$$

通过积分得到度序列  $DS$  的平均度:

$$\langle d \rangle = m \times \frac{g-1}{g-2} \quad (7)$$

由于假定每个用户只选择一个资源节点作为目的节点, 因此度序列  $DS$  的总度数等于  $U_{\Delta T}$  集合的节点数目, 即

$$NS \times \langle d \rangle = NU_{\Delta T} = NU \times (m + w \times s(\Delta T)) \quad (8)$$

由式 (7) 和式 (8) 得

$$g = \frac{2X-1}{X-1} = 2 + \frac{1}{X-1} \quad (9)$$

其中,

$$X = \frac{NU(m + w \times s(\Delta T))}{NS \times m} \quad (10)$$

由式 (9) 和式 (10) 可知, 在用户节点、资源节点以及用户行为的集聚特性确定的条件下,  $\gamma$  的取值是由参数  $m$  决定。

讨论  $m$  的取值: 首先,  $m$  是正整数; 其次, 为了满足网络构造算法第 2) 步中参数  $\gamma$  的取值条件 ( $\gamma > 2$ ), 则  $X-1 > 0$ , 由式 (10) 知,

$$0 < m < \frac{NU(m + w \times s(\Delta T))}{NS} \quad (11)$$

由式 (9)~式 (11) 可知,  $m$  取值越大,  $X$  就越小, 则参数  $\gamma$  就越大, 即用户访问资源节点形成的二分网络的幂律特性就越显著。

#### 4 实验结果及分析

仿真实验环境如下: 1) 在二维方格网络模型中, 假定访问节点和资源节点是随机地选择一个接入层路由器建立物理连接, 其中,  $NU=300$ ,  $NS=20$ ; 2) 选取  $8 \times 8$  的方格网络作为传输子网的拓扑结构, 即  $N=8$ ; 3) 假定传输子网的路由节点均采用型号为 H3C-S5500 的路由器, 则其转发能力和硬件性能不随时间发生改变, 由出厂状态决定,  $C_k=96\text{Mpacket/s}$ ,  $d_k=3.2\mu\text{s}$ ,  $l_k=0.0015$ ; 4) 假定网络中

所有用户节点对传输子网的时延和分组丢失率的要求相同, 则用户节点  $u_i$  的 QoS 要求记为  $D_i = D = 5\text{ms}$ ,  $L_i = L = 0.05$ ; 5) 网络性能可靠性指标中, 队列长度对数据分组性能的影响因子分别为  $a=3$ ,  $\beta=4$ , 关联参数  $\gamma=1.5$ ; 6) 仿真时间  $T=250$  时步。

符号说明:  $\text{Delay}_{R_G}(t)$ 、 $\text{Loss}_{R_G}(t)$  分别是第  $t$  时步, 网络中所有活动用户节点  $u_i$  与其目的节点  $s_j$  之间性能可靠性  $\text{Delay}_{R_{ij}}(t)$ 、 $\text{Loss}_{R_{ij}}(t)$  的均值。 $\text{Delay}_{R_G}$ 、 $\text{Loss}_{R_G}$  分别是仿真周期  $T$  步内, 参数  $\text{Delay}_{R_G}(t)$ 、 $\text{Loss}_{R_G}(t)$  的均值。

##### 4.1 用户行为的幂律特性

用户行为的幂律特性模型中, 参数  $m$  体现了用户访问资源节点形成的二分网络  $B_{U,S}(\Delta T)$  的幂律特性, 参数  $\Delta T$  影响着  $B_{U,S}(\Delta T)$  随时间行变的频率。

由式 (9) 式 (10) 可知,  $B_{U,S}(\Delta T)$  中资源节点  $S$  的度分布函数的幂指数  $\gamma$  的取值为

$$\begin{cases} \gamma_1 = 2 + \frac{NS \times m_1}{NU \times (m+w) - NS \times m_1}, & s(\Delta T) = 1 \\ \gamma_2 = 2 + \frac{NS \times m_2}{NU \times m - NS \times m_2}, & s(\Delta T) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

使正常性访问和突发性访问的时间单元内,  $B_{U,S}(\Delta T)$  的幂律特性相同, 即  $\gamma_1 = \gamma_2$ , 则

$$m_2 = \frac{m}{m+w} m_1 \quad (13)$$

其中, 参数  $m_1$ ,  $m_2$  的取值范围为

$$\begin{cases} 0 < m_1 < \frac{NU \times (m+w)}{NS} \\ 0 < m_2 < \frac{NU \times m}{NS} \end{cases} \quad (14)$$

由本节的实验环境参数, 可得

$$m_2 = \frac{5m_1}{8} \quad (15)$$

则  $m_1$ ,  $m_2$  分别为

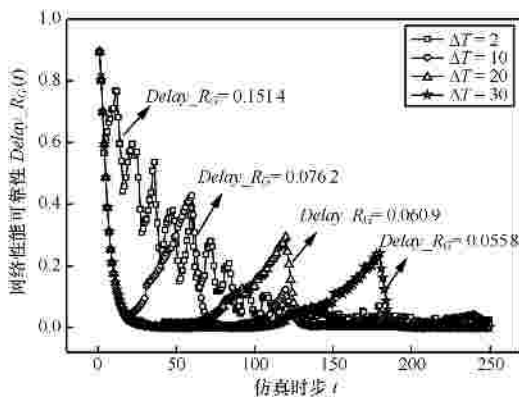
$$\begin{cases} 0 < m_1 < 12 \\ 0 < m_2 < 7.5 \end{cases} \quad (16)$$

在本文实验中, 具有突发性访问的  $\Delta T$  单元内, 参数  $m$  取值为  $m_1$ ; 具有正常性访问的  $\Delta T$  单元内, 参数  $m$  取值为  $5m_1/8$ 。因此, 无论  $\Delta T$  单元内是否发生突发性访问,  $B_{U,S}(\Delta T)$  的度分布函数的幂指数相等, 由式 (12) 可得参数  $\gamma$

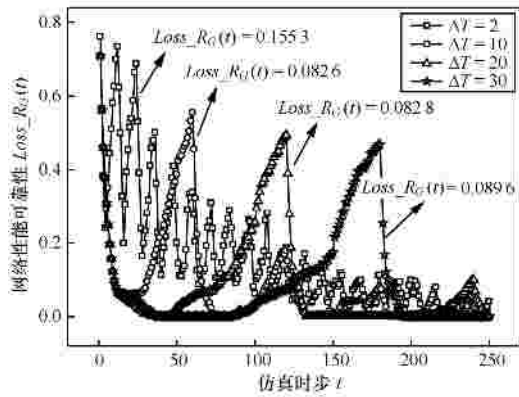
$$g = \frac{24 - m_1}{12 - m_1} \quad (17)$$

在用户行为集聚特性确定的条件下 ( $r=5\text{Mpacket/s}$ ,  $\mu = 0.5$ ,  $\rho = 0.3$ ,  $\rho = 2$ ,  $H = 4$ ), 分析参数  $\Delta T$ 、 $m_1$  对网络性能可靠性的影响。

在  $m_1 = 8$  的条件下, 分析参数  $\Delta T$  对网络性能可靠性的影响, 如图 2 所示。当  $\Delta T$  较小时,  $B_{U,S}(\Delta T)$  衍变频繁, 具有高访问量的资源节点形成的小子集频繁变动, 即用户访问量在网络资源中的分布频繁更新, 使得  $Delay\_R_G(t)$ 、 $Loss\_R_G(t)$  随仿真时间  $t$  的波动变化较快; 当  $\Delta T$  较大时, 其波动变化明显减弱。较小的  $\Delta T$  带来  $B_{U,S}(\Delta T)$  的频繁衍变, 致使用户访问量在网络资源中的分布较为均匀, 网络性能可靠性得到一定的改善。



(a) 以时延表征的网络性能可靠性  $Delay\_R_G(t)$



(b) 以分组丢失率表征的网络性能可靠性  $Loss\_R_G(t)$

图 2 参数  $\Delta T$  对  $Delay\_R_G(t)$ 、 $Loss\_R_G(t)$  的影响

在  $\Delta T = 2, 20, 50$  的条件下, 网络性能可靠性  $Delay\_R_G$ 、 $Loss\_R_G$  随  $m_1$  的变化曲线, 如图 3 所示。由图可知,  $Delay\_R_G$ 、 $Loss\_R_G$  不随  $m_1$  的增大而发生剧烈变化, 即二分网络  $B_{U,S}(\Delta T)$  的度分布函数的幂指数  $\rho$  对网络性能可靠性的影响较小。

为什么选择在  $r = 5 \text{ Mpacket/s}$  的条件下, 分析用户行为的集聚特性? 图 4 给出了  $\mu = 0.5$ ,  $\rho = 0.3$ ,  $\rho = 2$ ,  $H = 4$ ,  $m_1 = 8$ ,  $\Delta T = 2$  的条件下,  $Delay\_R_G$ 、

$Loss\_R_G$  随  $r$  的变化曲线。随着  $r$  的增大, 到达临界值  $r_1 = 4 \text{ Mpacket/s}$ , 网络性能可靠性开始迅速下降, 当  $r$  到达临界值  $r_2 = 6 \text{ Mpacket/s}$ , 网络性能可靠性降为 0。通过试验分析, 当  $r < r_1$  时, 无论参数  $m_1$  和  $\Delta T$  取何值, 网络性能可靠性仍然保持在较高水平; 当  $r > r_2$  时, 无论  $m_1$  和  $\Delta T$  取何值, 网络性能可靠性始终为 0。在负载很轻的条件下, 用户访问行为不会对网络性能可靠性带来影响; 在负载很重的条件下, 网络非常拥塞甚至崩溃, 失去分析用户访问行为对网络性能可靠性影响的意义。因此, 在网络易发生相变的流量负载下, 研究用户访问行为对网络性能可靠性的影响, 有助于通过控制用户的访问行为来提高网络性能可靠性。

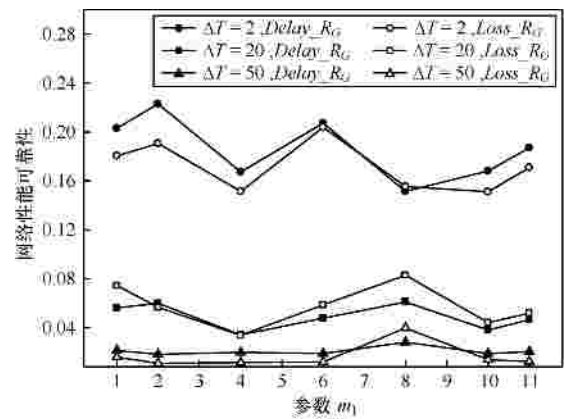


图 3 参数  $m_1$  对  $Delay\_R_G$ 、 $Loss\_R_G$  的影响

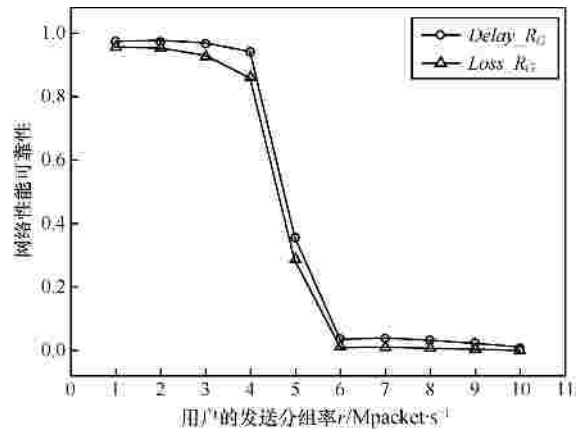


图 4 发送分组率  $r$  对  $Delay\_R_G$ 、 $Loss\_R_G$  的影响

#### 4.2 用户行为的集聚特性

在用户行为的集聚特性模型中,  $r$  体现了网络流速的大小;  $H$  体现了突发性访问的频度特性;  $\rho$  体现了突发性访问的强度特性;  $\rho$ 、 $\mu$  的比值 ( $\rho = \rho/\mu$ ) 体现了突发性访问与正常性访问时间单元之间活动用户数量的跳跃程度。在  $\mu$  确定的条件下, 随着

$\rho$  的增加 ( $0 < \rho < 1 - \mu$ )，注入网络流量的增加，必然降低网络性能可靠性。因此本文仅考虑  $\rho$  取边界值时，网络性能可靠性的变化。

在用户行为的幂律特性确定的条件下 ( $\Delta T = 2, m_1 = 1$ )，分析  $r, \rho, H, \omega$  对网络性能可靠性的影响。

在  $\rho = 2, H = 4$  的条件下， $r, \omega$  对网络性能可靠性参数  $Delay_{RG}, Loss_{RG}$  的影响，如图 5 所示。当  $\rho$  确定时， $Delay_{RG}, Loss_{RG}$  随发送分组率  $r$  的增大出现了相变行为，当  $r$  增大到临界值  $r_C$  时， $Delay_{RG}, Loss_{RG}$  迅速下降为 0。 $r_C$  刻画了网络在一定  $\rho$  值下，能够承担的最大用户发送分组率。图中还示出了不同  $\rho$  值下网络性能可靠性的相变点。当  $\rho$  增大时，相变点逐渐右移 ( $r_{C1} < r_{C2} < r_{C3} < r_{C4} < r_{C5}$ )。也就是说，当正常性访问时间单元内活动用户较少时，网络能够容忍高强度的突发性访问。

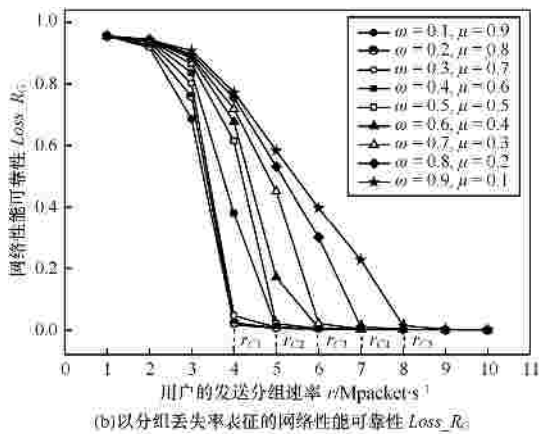
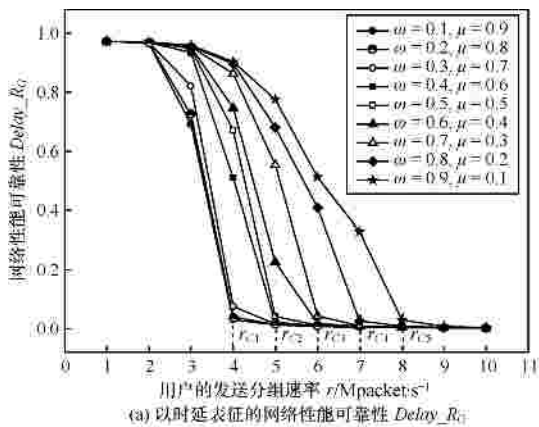
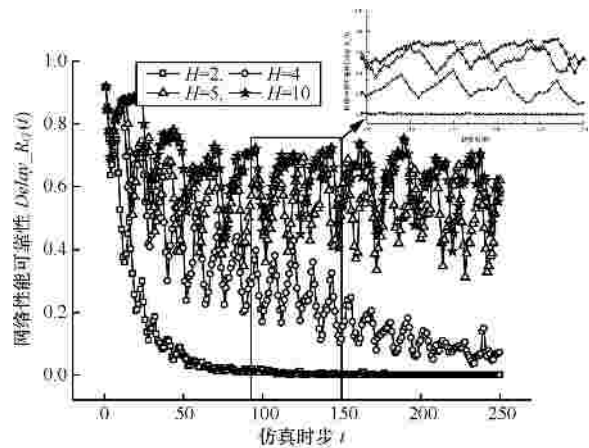


图 5 参数  $r, \mu, \omega$  对网络性能可靠性的影响

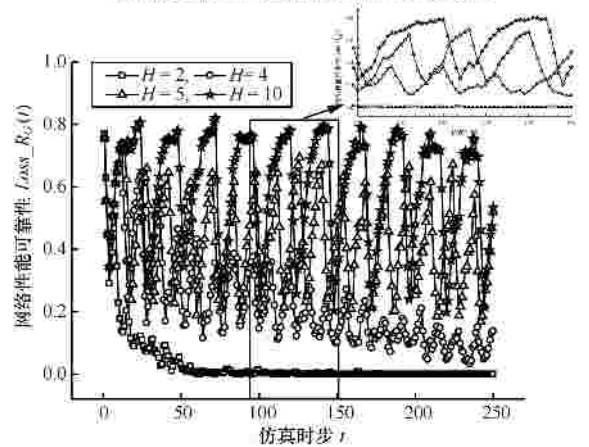
在  $r = 5 \text{ Mpacket/s}, \rho = 0.5/0.3$  的条件下，分析  $H, \rho$  对网络性能可靠性的影响。

在  $\rho = 2$  时， $H$  对网络性能可靠性参数  $Delay_{RG}(t), Loss_{RG}(t)$  的影响，如图 6 所示。在突发性访问发生的频率较大时 ( $1/H = 1/2, 1/4$ )， $Delay_{RG}(t),$

$Loss_{RG}(t)$  随  $t$  迅速降低而逐渐趋于 0；当频率较小时 ( $1/H = 1/5, 1/10$ )， $Delay_{RG}(t), Loss_{RG}(t)$  逐渐收敛在一定区间内呈周期性波动。图 6 分别是  $Delay_{RG}(t), Loss_{RG}(t)$  在  $t = [100, 150]$  内的放大图， $Delay_{RG}(t), Loss_{RG}(t)$  分别稳定在  $[0.4, 0.7], [0.2, 0.8]$  区间内，随突发性访问的发生而呈规律性的波动变化，其中频率越小，波动变化就越缓慢。当突发性访问发生时，高速数据流量的逐渐累积使网络性能可靠性下降；当其结束时，在低速数据流量下，网络有缓冲时间处理堆积的数据分组。如果突发性访问发生的频率较高，将不能释放堆积的流量，致使网络性能可靠性直线下降。



(a) 以时延表征的网络性能可靠性  $Delay_{RG}(t)$



(b) 以分组丢失率表征的网络性能可靠性  $Loss_{RG}(t)$

图 6 参数  $H$  对  $Delay_{RG}(t), Loss_{RG}(t)$  的影响

在  $\rho = 2, 4$  的条件下， $H$  对网络性能可靠性参数  $Delay_{RG}, Loss_{RG}$  的影响，如图 7 所示。当突发性访问发生的频率逐渐增大到临界值  $1/H_{C1} = 1/5, 1/H_{C2} = 1/10$  时，网络性能可靠性迅速降低，直至为 0。临界值是网络在突发性访问的持续时间不变下，能够承受突发性访问发生的最高频率。

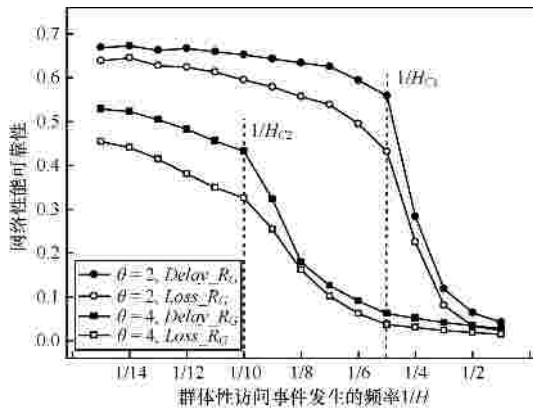
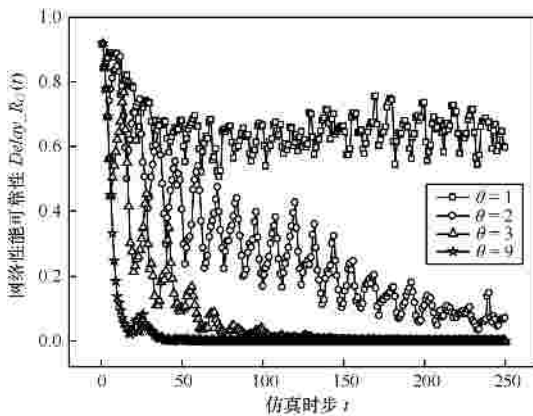
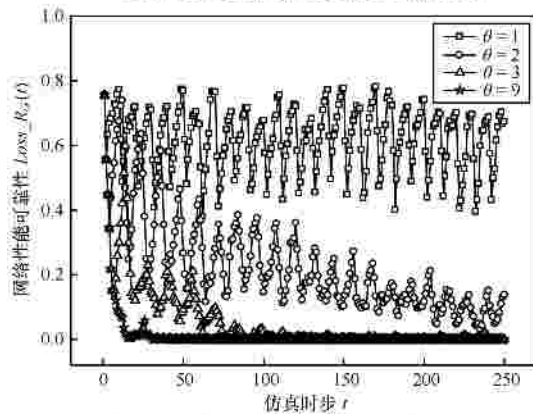


图 7 Delay<sub>R<sub>G</sub></sub>, Loss<sub>R<sub>G</sub></sub>与 H 之间的关系曲线

在  $H = 4$  时,  $\theta$  对网络性能可靠性参数  $Delay_{R_G}(t)$ 、 $Loss_{R_G}(t)$  的影响, 如图 8 所示。当突发性访问的持续时间较短时 ( $\theta = 1$ ),  $Delay_{R_G}(t)$ 、 $Loss_{R_G}(t)$  分别稳定在区间  $[0.5, 0.7]$ 、 $[0.5, 0.8]$  内呈周期性波动变化。当持续时间增大时 ( $\theta = 2, 3, 9$ ),  $Delay_{R_G}(t)$ 、 $Loss_{R_G}(t)$  会随  $t$  迅速降低而逐渐趋于 0。长时间的突发性访问累积大量数据分组, 使网络在正常性访问时间内, 没有足够的缓冲能力来转发拥塞的数据分组, 使网络性能可靠性直线下降。



(a) 以时延表征的网络性能可靠性  $Delay_{R_G}(t)$



(b) 以分组丢失率表征的网络性能可靠性  $Loss_{R_G}(t)$

图 8 参数  $\theta$  对  $Delay_{R_G}(t)$ 、 $Loss_{R_G}(t)$  的影响

在  $H=2、4$  的条件下,  $\theta$  对网络性能可靠性  $Delay_{R_G}$ 、 $Loss_{R_G}$  的影响, 如图 9 所示。当突发性访问的持续时间逐渐增长到临界值  $\theta_{c1}=2$ ,  $\theta_{c2}=3$  时, 网络性能可靠性降低为 0。 $\theta_{c1}$ 、 $\theta_{c2}$  分别是网络在突发性访问发生的频率为  $H=2、4$  的条件下, 能够承受突发性访问发生的最长持续时间。

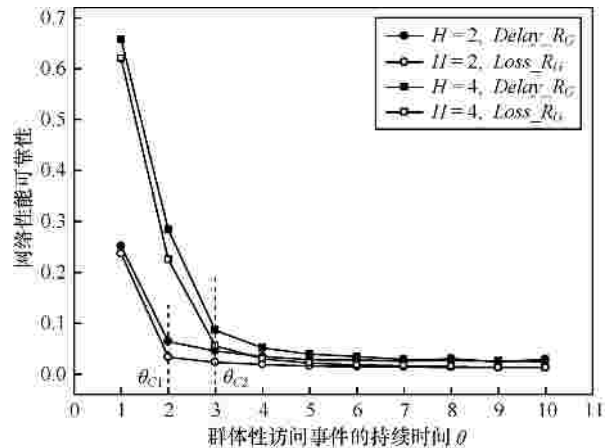


图 9 参数  $\theta$  对  $Delay_{R_G}$ 、 $Loss_{R_G}$  的影响

综合分析可知, 为了保证网络可靠的传输满足服务要求的数据流, 必须控制突发性访问发生的频率  $H$  和持续时间  $\theta$  在临界值范围之内, 这为网络流量的监管和整形提供了定量的数据指导。

### 5 结束语

在二维方格网络模型的基础上, 对用户访问行为的幂律特性和集聚特性进行了建模, 借助网络相变分析了这些统计特性对网络性能可靠性带来的影响。研究结果表明如下。

- 1) 用户访问资源节点形成的二分网络的度分布函数的幂指数对网络性能可靠性的影响较小; 但这种二分网络中具有高访问量的资源节点子集的频繁衍变却会改善网络的性能可靠性。这是因为具有高访问量的资源节点形成的小子集的频繁变更优化了用户访问量在网络中的分布。
- 2) 随着突发性访问与正常性访问时间单元之间活动用户数量比值的增大, 网络性能可靠性的相变点逐渐右移, 即网络越能够容忍高强度的突发性访问。相变点刻画了网络在一定流量约束下能够承受突发性访问发生的强度, 为流量的监管和整形提供了定量指导, 进而为网络稳定而可靠的运行提供了保障。
- 3) 突发性访问发生的频率和持续时间在一定程度上也影响着网络性能可靠性的相变。

用户访问网络资源的过程在请求时间、分组长度、比特速率等方面呈现出多种统计规律性,本文仅研究了幂律特性和集聚特性对网络性能可靠性的影响,用户行为的其他统计特性对网络性能可靠性的影响研究将在后续的工作中展开。

### 参考文献:

- [1] 丁开盛, 张学渊, 梁雄健. 通信网可靠性的定义及其综合测度指标[J]. 通信学报, 1999, 20(10): 75-78.  
DING K S, ZHANG X Y, LIANG X J. The definition and general measuring indicator on reliability of communications network[J]. Journal on Communications, 1999, 20(10): 75-78.
- [2] 刘爱民, 刘有恒. 部件不可靠下的通信网业务性能分析[J]. 电子学报, 2002, 30(10): 1-6.  
LIU A M, LIU Y H. Traffic performance analysis of network with unreliable components[J]. ACTA Electronica Sinica, 2002, 30(10):1-6.
- [3] 熊庆旭, 刘有恒. 基于网络状态之间关系的网络的可靠性分析[J]. 通信学报, 1998, 19(3): 55-61  
XIONG Q X, LIU Y H. Analysis of network performability based on relationship of network states[J]. Journal on Communications, 1998, 19(3):55-61.
- [4] 冯海林. 网络系统中可靠性问题的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2004.  
FENG H L. The Study on Reliability Problems in Network Systems[D]. Xi'an: Xidian University, 2004.
- [5] ZHEN Y, WU M Q, WU D P, *et al.* Toward path reliability by using adaptive multi-path routing mechanism for multimedia service in mobile Ad-hoc network[J]. The Journal of China University of Posts and Telecommunications, 2010, 17(1): 93-100.
- [6] LIN Y K. Reliability evaluation of a revised stochastic flow network with uncertain minimum time[J]. Physica A, 2010, 389(6): 1253-1258.
- [7] FAN H H, SUN X H. A multi-state reliability evaluation model for P2P network[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2010, (95): 402-411.
- [8] BALACHANDRAN A, VOELKER G M, BAHL P, *et al.* Characterizing user behavior and network performance in a public wireless LAN[A]. The ACM SIGMETRICS International Conference on measurement and Modeling of Computer Systems[C]. New York, USA, 2002.195-205.
- [9] SCHWAB D, BUNT R. Characterizing the use of a campus wireless network[A]. The IEEE International Conference on Computer Communications[C]. Hong Kong, China, 2004.1-9.
- [10] KOTZ D, ESSIEN K. Characterizing usage of a campus-wide wireless network[A]. The International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. Georgia, USA, 2002.107-118.
- [11] TANG D, BAKER M. Analysis of a metropolitan-area wireless network[J]. Wireless Networks, 2002, 8: 107-120.
- [12] 马卫东, 李幼平, 马建国等. 面向 Web 网页的区域用户行为实证研究[J]. 计算机学报, 2008, 31(6): 960-967.  
MA W D, LI Y P, MA J G, *et al.* Empirical study of region user behaviors for Web pages[J]. Chinese Journal of Computers, 2008, 31(6): 960-967.
- [13] 马卫东, 王磊, 李幼平等. 用户需求行为对互联网动力学整体特性的影响[J]. 物理学报, 2008, 57(3): 1381-1388.  
MA W D, WANG L, LI Y P, *et al.* Influence of user requirement behaviors on internet collective dynamics[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(3): 1381-1388
- [14] 蔡青松, 李子木, 胡建平. Internet 上的流媒体特性及用户访问行为研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(1): 25-30.  
CAI Q S, LI Z M, HU J P. Study on characterizing streaming media and user access to media on the Internet[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(1): 25-30.
- [15] 赵娟, 郭平, 邓宏钟等. 基于信息流动力学的通信网络性能可靠性建模与分析[J]. 通信学报, 2011, 32(8): 159-164.  
ZHAO J, GUO P, DENG H Z, *et al.* Model and analysis of performance reliability for communication networks based on traffic dynamics[J]. Journal on Communications, 2011, 32(8): 159-164.
- [16] 李一鹏, 任勇, 袁坚等. 网络相变的非线性成因与分布式代理对策[J]. 清华大学学报, 2009, 49(8): 1131-1134.  
LI Y P, REN Y, YUAN J, *et al.* Nonlinear phase transitions in networks and distributed proxy approach[J]. Journal of Tsinghua University, 2009, 49(8): 1131-1134.
- [17] YE W C, LIN Y C, CHUNG Y Y. Performance analysis of cellular automata monte carlo simulation for estimating network reliability[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37: 3537-3544.
- [18] NEWMAN M E J. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law[J]. Contemporary Physics, 2005, 46: 323-351.
- [19] WU J, DENG H Z, TAN Y J, *et al.* Vulnerability of complex networks under intentional attack with incomplete information[J]. Journal Physical A, 2007, 40(11): 2665-2671.

### 作者简介:



赵娟 (1982-), 女, 四川苍溪人, 博士, 主要研究方向为复杂网络、网络系统可靠性。

(通信作者) 郭平 (1961-), 女, 四川荣县人, 博士, 中国人民解放军后勤工程学院教授, 主要研究方向为网络服务质量、信息安全。E-mail: guoping61@126.com。

邓宏钟 (1974-), 男, 湖南衡阳人, 博士后, 国防科技大学副教授, 主要研究方向为复杂系统理论、分布式人工智能和遗传算法。

吴俊 (1980-), 男, 湖北荆门人, 博士, 国防科技大学副教授, 主要研究方向为复杂网络理论及其应用。

谭跃进 (1958-), 男, 湖南长沙人, 国防科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为系统优化与系统集成技术。

张敏 (1974-), 女, 四川南充人, 中国人民解放军后勤工程学院副教授, 主要研究方向为网络性能优化、信息安全。