

一种计算机网络的元胞自动机模型及分析^{*}

袁 坚 任 勇 山秀明

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

(1999 年 5 月 2 日收到)

通过分析一种计算机网络元胞自动机模型, 对网络内部结点的整体行为进行了探讨. 研究表明, 在负载守恒的传输过程中, 各网络结点的吞吐量和缓存区的排队长度在空间和时间上均呈现幂率分布, 承受系统中局部负载的结点数变化的功率谱呈现 $1/f$ 噪声的特点. 网络结点的整体行为表现出自组织临界现象. 排队长度的分布呈现幂率, 预示着较大的拥塞以较小的概率发生. 吞吐量在时间上的分布呈现幂率, 或许为业务量呈现自相似性提供一种合理的解释.

PACC: 0540J; 8980H

1 引 言

计算机互联网络(Internet)已发展形成了一个庞大的复杂系统. 现有的手段已能够展现出这一巨系统的概貌^[1]. 网络周边数以千万计的用户终端通过中间结点(网关和路由器等)联接, 形成一个非常不规则的拓扑结构. 对这样的网络进行仿真模拟, 无疑是困难重重. 这种困难不仅体现在拓扑结构和链路的复杂性, 以及协议和业务种类的多样性方面, 还表现为 Internet 的规模和技术正在不断地发展之中^[2]. 网络复杂的行为至今尚认识得很少, 而仿真模拟无疑在网络特征刻划和技术策略实施等方面起着关键作用, 因此探究本质上的不变性就显得尤为重要.

对现有计算机网络业务量的广泛实验研究发现, 业务量呈现自相似的特性. 而该特性产生的物理机制至今尚未有一个合理的解释. Willinger 等人提供了一个简单的物理解释, 他们认为大量 ON/OFF 过程的叠加, 当 ON 或 OFF 分布是重拖尾时, 业务量会呈现自相似的特性^[3]. 类似的工作还涉及传输文件大小重拖尾分布的研究和传输控制协议的作用^[4], 直至用户行为影响^[5]. 然而, 这一类解释明显地忽略了业务源竞争网络资源(带宽和缓存)表现出的非线性相互作用, 也没有强调网络在传输过程中各自自治结点所呈现出的相互关系.

目前, Internet 的资源分配主要是利用传输控制协议, 在用户端进行端到端的流量控制, 力图使数

据包进入网络的速度等于离开网络的速度, 尽量保证网络中数据包的个数守恒; Internet 内部的结点之间并没有协作. 然而, 网络拥塞仍然时常发生, 拥塞的程度和持续的时间一般都无法确定. Huberman 等人认为, 目前的计费方式使得用户的行为导致拥塞发生, 表现为数据包传输时间上的波动^[6]. 也有人认为传输控制协议可以导致这种波动^[7]. 拥塞总是发生在传输瓶颈, 很容易理解, 用户加重的负载和传输控制协议的作用在瓶颈处的体现. 但是, 拥塞在时间和空间上表现得飘忽不定, 这个问题却一直未被很好地理解.

无法确知拥塞何时何地会发生, 这一点就如同公路交通的情况. 元胞自动机模型由于其简单性和在计算机上的易操作性, 越来越多地被用于交通流的模拟^[8]. 利用统计物理和非线性动力学, 目前已对交通流有了更好的理解^[9]. Nagel 的研究清楚地表明, 高速公路上拥塞的形成是一种整体行为, 拥塞的输出自组织地达到最大吞吐量的临界状态^[10]. 对于计算机网络, 最新的研究已经将相变的概念用于解释数据包传输时间的波动^[11, 12]. Tretyakov 等人对一种计算机网络模型相变的研究, 发现网络在临界点附近处于最有效的状态^[11]. 而 Ohira 等人研究另一种网络模型相变时, 也推断路由器的整体行为对相变点的变化起着关键作用^[12]. 然而目前尚没有重视交通流研究的进展可能对网络研究的影响. Csabai 早在数年前就认识到这一点, 呼吁网络研究人员重视交通流研究的进展. 虽然他在这方面没有做相应的工作, 但他在对传输时间测量的基础上, 分

析出其具有 $1/f$ 噪声的特点^[13].

本文通过研究一种计算机网络元胞自动机模型,对网络内部结点的整体行为进行了探讨.本文的研究表明,在负载守恒的传输过程中,各网络结点的吞吐量和缓存区的排队长度在空间和时间上均呈现幂率分布,承受系统中局部负载的结点数变化的功率谱呈现 $1/f$ 噪声的特点,整体行为表现出自组织临界现象^[14].排队长度在空间和时间上的分布均呈现幂率,预示着较大的拥塞以较小的概率发生.吞吐量在时间上的分布呈现幂率,这或许为业务量呈现自相似性提供一种合理的解释.这一工作的进一步深入,将有利于探究网络本质上的不变性,有助于网络拥塞的理解和相应对策的探讨.

2 模型与演化步骤

多个连接共享一个结点的简化模型如图 1(a)所示.图中结点的传输速率为 μ ,缓存区用于存放来不及传输的数据包.多个业务源在传输控制协议的支配下发送数据包,尽量保持输入的数据包与输出的一致,以免过多的数据包在有限的缓存区滞留,造

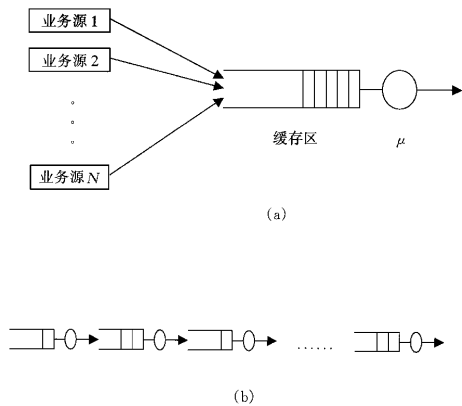


图 1 (a)多连接共享一个结点的简化模型和
(b)多结点链接示意图

成溢出.如果将数据包比作车辆,就如同过多的车辆驶入一瓶颈路段而导致拥塞,过多输入的数据包也会拥塞在缓存区,而此时结点会以最大吞吐量缓解拥塞.结点最有效的状态,应该是输入的数据包正好保持结点以最大吞吐量的传输,同时保持缓存区数据包在最少个数附近,这样一种临界状态.这是将数据包当作作用单元的情形,在本文中不详加讨论.下面将结点作为作用单元,来分析网络结点的整体

行为.

现讨论在计算机网络分析中,一直起着主导作用的 Kleinrock 独立假定^[15].该假定把所有结点的输入过程都当作是相互独立的.这样网络分析的难度大为减低.而在网络中,一连串数据包进入某个结点,经排队处理后转发出去,又变为下一个结点的输入.显然,这两个输入过程是相关的.为了分析网络结点这种相互关系,将结点链接起来,如图 1(b)所示.为简化模型,忽略了链路的分枝,也略去结点之间的连接,认为上一个结点的输出直接进入下一个结点的缓存区排队.由此就可以抽象为一维元胞自动机模型.

考虑具有 L 个格点的一维直线链,边界条件可以选择开放或周期的.每个格点可以被一个粒子占据或保持空位.让 M 个粒子随机地分布在 L 个格点($L > M$)上.每个粒子代表一个结点,粒子间空位格点的个数代表缓存区排队长度.粒子在同一时刻的相对移动体现出结点传输状态的动力学特性.应注意到粒子的运动方向向右, M 个结点的顺序与图 1(b)中结点由左至右的顺序相反,故最右边的粒子表示图 1(b)中最左边的结点.对于任意两个相邻的粒子,它们之间空位格点的个数表示了左边(粒子)结点缓存区排队长度;右边粒子 i ($2 \leq i \leq M$)运动加快(对应结点吞吐量加大),将导致其相邻的左边粒子 $i-1$ 运动加快,以减少其缓存区排队长度.以下将不加区分地使用粒子和结点.在此选择周期的边界条件,也即最左边结点的输出又成为最右边结点的输入,以此保证负载守恒.对任意的初始设置,系统以等间隔离散时步演化,所有结点状态的并行更新包含如下 4 个的步骤:

- 1)若结点 i ($1 \leq i \leq M$)目前的吞吐量 $v_i(n)$ 低于最大吞吐量 $v_{\max}$,并且其缓存区排队长度 $d_i(n) > v_i(n)$,则 $v_i(n+1) = v_i(n) + 1$.
- 2)若 $v_i(n) \geq d_i(n)$,则 $v_i(n+1) = d_i(n)$.
- 3)若 $v_i(n) > 0$,以一定的概率 p ,每个结点的吞吐量 $v_i(n+1) = v_i(n) - 1$.
- 4)每个结点以 $v_i(n+1)$ 并行更新状态,则 $d_i(n+1) = d_i(n) + v_{i+1}(n+1) - v_i(n+1)$;当 $i = M$ 则 $i+1$ 结点表示结点 1.

在步骤 3)中引入随机化是考虑到实际网络的扰动,此处可理解为网络系统额外开销引起的扰动.无此步骤系统状态会陷于某种确定的模式.

3 实验结果

图 2 为典型的时空状态演化示意图. 横轴代表空间(L 个格点) 纵轴代表时间. 其中 $L = 1000$, $M = 100$, $v_{\max} = 20$, $p = 0.05$. 图 2 所示 1000 个时步为抛去 5000 个时步初始过渡过程后得到的. 由每条点曲线可体现一个粒子的运动过程. 为清晰起见, 图 2 只示出部分等间隔粒子演化曲线. 曲线越平坦, 表示结点的吞吐量越大, 而吞吐量的减小恰如水面泛起的涟漪, 随时间波及远处. 在不同时步上, 粒子之间间距的变化代表了各结点缓存区排队长度的波动.

图 3 为存在一个瓶颈结点情况下的时空状态演化示意图. 所取参数与图 2 相同, 只是将其中一个结点的最大吞吐量定为 5. 由图 3 可见, 瓶颈结点缓存区排队长度始终保持较大, 因而始终以最大吞吐量缓解拥塞. 其余结点也因此在这种吞吐量水平上波动.

为定量研究吞吐量和缓存区排队长度在时间和空间上的变化情况, 取 $L = 50000$, $M = 4000$, $v_{\max} = 100$, $p = 0.05$. 在对 10 万个时步上的变化进行统计的基础上, 得到吞吐量和缓存区排队长度在时间和空间的分布. 图 4(a) 为各结点缓存区排队长度在同一时步上空间的分布 $P_{d\text{space}}(d)$. 图 4(b) 为单个结点排队长度在时间上的分布 $P_{d\text{time}}(d)$. 图 5(a) 为各

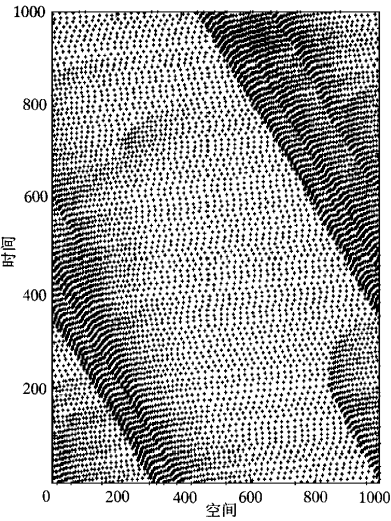


图 2 典型的时空状态演化示意图

结点吞吐量在同一时步上空间的分布 $P_{v\text{space}}(v)$. 图 5(b) 为单个结点吞吐量在时间上的分布 $P_{v\text{time}}(v)$. 图 4(a) 和图 5(a) 中直线的斜率为 -1.25 , 图 4(b) 和图 5(b) 中直线的斜率为 -1.15 . 可见, 排队长度和吞吐量在空间和时间上的分布均呈现幂率. 分布曲线在大尺度上偏离幂率是由于有限规模效应.

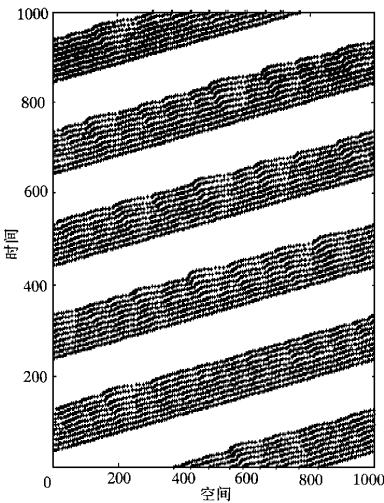


图 3 存在一个瓶颈结点情况下的时空状态演化示意图

排队长度可以反映拥塞状况, 排队长度在空间和时间上的分布均呈现幂率, 预示着较大的拥塞以较小的概率发生. 吞吐量在时间上的分布呈现幂率, 这或许是业务量呈现自相似性的一种合理解释. 为进一步了解承受系统中局部负载的结点数变化情况, 在 L 个格点上的一段长为 l 个格点的固定区域, 统计其上粒子数目 $N(t)$ 随时间的变化. 图 6 为 $l = 500$ 时, 用 Welch 平均周期图法得到的 $N(t)$ 的功率谱密度 $S(f)$, 其斜率约为 -2.3 , $S(f)$ 体现出 $1/f$ 噪声的特点. 由此可见, 系统行为表现出自组织临界现象. 目前的理解只是指出幂率的存在, 而对幂指数的大小尚未及讨论.

4 结论与讨论

Internet 提供的服务都是一种所谓的尽力而为的服务(best-effort service), 服务质量没有保障. 传统的数据业务由于对传输延时表现出更大的弹性, 因此在 Internet 上得以很好地运作. 从发展趋势来

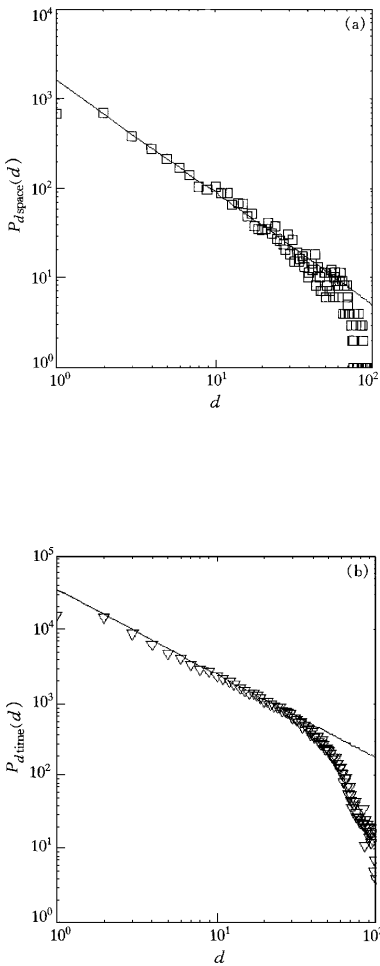


图 4 (a)各结点缓存区排队长度在同一时步上空间的分布 $P_{d_{space}}(d)$ 和 (b) 单个结点排队长度在时间上的分布 $P_{d_{time}}(d)$

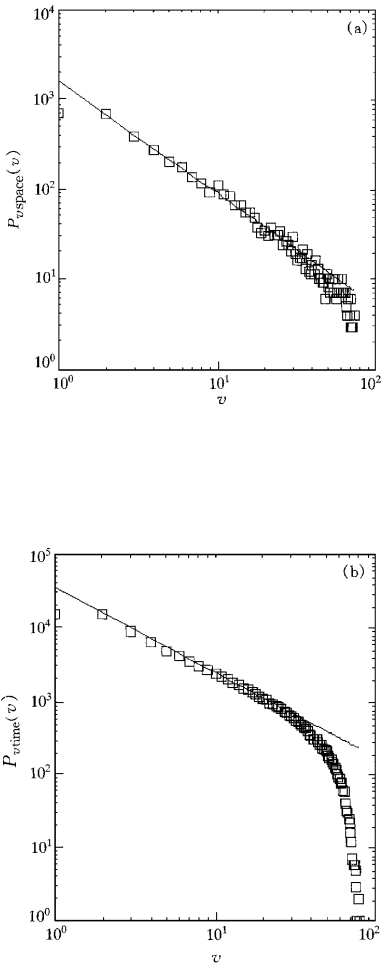


图 5 (a)各结点吞吐量在同一时步上空间的分布 $P_{v_{space}}(v)$ 和 (b) 单个结点吞吐量在时间上的分布 $P_{v_{time}}(v)$

看 ,Internet 必须支持多种应用 ,应该有对不同应用提供不同等级服务的机制^[16]. Huberman 等人^[6]的研究说明了 Internet 面临的另外两个重要问题 :Internet 逐步走向全球化和商业化 ,不可能完全依赖用户的合作来控制拥塞 ,控制的重点应该从终端用户转移到网络本身 ;新的 Internet 服务模型必须与一个合理的计费模型融合 .然而 ,新策略研究全面考虑系统改进带来的影响 ,尤其是在目前对网络这一复杂系统的整体行为尚知之甚少 的情况下 ,无疑是一个巨大的挑战 .

本文的研究表明 ,在负载守恒的传输过程中 ,各网络结点的吞吐量和缓存区的排队长度在空间和时间上的分布均呈现幂率 ,承受系统中局部负载的

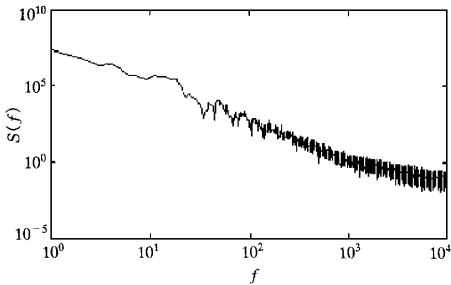


图 6 $N(t)$ 的功率谱密度 $S(f)$

结点数变化的功率谱呈现 $1/f$ 噪声的特点 ,系统的整体行为表现出自组织临界现象 .排队长度的分布

呈现幂率,预示着较大的拥塞以较小的概率发生.吞吐量在时间上的分布呈现幂率,这或许是业务量呈现自相似性的一种合理解释.这一工作的深入将有利于探究网络本质上的不变性,有助于网络拥塞的理解和相应对策的探讨.

- [1] K. Claffy ,T. E. Monk ,D. Mcrobb ,*Nature* ,**397**(1999) ,Web Matter <http://helix.nature.com/webmatters/> for in :*Science* , **282**(1998) ,375.
- [2] V. Paxson S. Floyd ,Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference ,1997 ,p. 1037.
- [3] W. Willinger ,M. S. Taqqu ,R. Sherman *et al.* , *IEEE/ACM Transactions on Network* **5**(1997) ,71.
- [4] K. Park ,G. Kim ,M. Crovella ,Proceedings of the International Conference on Network Protocols ,1996 ,p. 171.
- [5] M. E. Crovella ,A. Bestavros ,M. S. Taqqu ,*A Practical Guide to Heavy Tails : Statistical Techniques and Applications* (Birkhäuser ,Boston ,1998) ,pp. 3—25.
- [6] B. A. Huberman ,R. M. Lukose ,*Science* ,**277**(1997) ,535.
- [7] J. Crowcroft ,M. Luby ,V. Paxson ,*Science* ,**280**(1998) ,179.
- [8] P. M. Simon ,K. Nagel ,*Phys. Rev.* ,**E58**(1998) ,1286.
- [9] D. Helbing ,M. Treiber ,*Science* ,**282**(1998) ,2001.
- [10] K. Nagel ,M. Paczuski ,*Phys. Rev.* ,**E51**(1995) ,2909.
- [11] A. Y. Tretyakov ,H. Takayasu ,M. Takayasu ,*Physica* ,**A253**(1998) ,315.
- [12] T. Ohira ,R. Sawatari ,*Phys. Rev.* ,**E58**(1998) ,193.
- [13] I. Csabai ,*J. Phys. A :Math. Gen.* ,**27**(1994) ,L417.
- [14] P. Bak ,C. Tong ,K. Wiesenfeld ,*Phys. Rev.* ,**A38**(1988) ,364.
- [15] L. Kleinrock ,*Queueing System ,Volume II :Computer Applications* (Wiley ,New York ,1976) ,p. 322.
- [16] S. Shenker ,*IEEE J. Selected Areas in Commun.* ,**13**(1995) , 1176.

INVESTIGATION OF A CELLULAR AUTOMATON MODEL FOR COMPUTER NETWORK

YUAN JIAN REN YONG SHAN XIU-MING

(*Department of Electronic Engineering ,Tsinghua University ,Beijing 100084*)

(Received 2 May 1999)

ABSTRACT

We have studied the collective behavior of computer network nodes by using of a cellular automaton model. It is shown that when the load of network is constant ,the probability distributions for throughputs and buffer contents of nodes are power-law in both space and time. And the power spectrum of the number of nodes bearing a constant part of the system load has the features of a $1/f$ noise. It can be seen as yet another example of self-organized criticality. Power-law decay in the distribution of buffer contents implies that large congestion in network occurs with less probability. The temporal power-law distribution for throughput may become another explanation for the observed self-similarity in computer network traffic.

PACC : 0540J ; 8980H