

互联网络数据包传输的一种简单元胞自动机模型

刘 锋 任 勇 山秀明

(清华大学电子工程系 北京 100084)

(2001年9月6日收到 2001年10月29日收到修改稿)

提出了一种描述计算机互联网络数据包传输的简单元胞自动机模型,并研究了沿着网络固定路径中路由节点数据包队列长度和传输时间的统计特性。计算机仿真结果表明,根据数据包输入速率和路由节点平均最大传输速率的不同,系统存在自由流和拥塞两种相态。在自由流状态,路由节点数据包排队长度和传输时间都呈现幂律特性;在拥塞状态,路由节点数据包排队长度呈现白噪声特征,而传输时间在低频段为幂律、高频段为白噪声特征。仿真结果和已有文献和经验数据得到的结论一致。

关键词:元胞自动机, $1/f$ 噪声, 幂律, 计算机网络

PACC: 0540, 0560

1. 引 言

计算机互联网络(Internet)已经发展成为一个巨大的复杂系统,网络的数以千万计的终端用户通过网关和路由器(网络节点)相连,形成一个非常复杂的不规则的拓扑结构。而且,越来越多的信息按照协议通过互联网络由各种信息资源传给不同的终端用户。随着用户数量和网络连接的迅猛增加,网络拓扑结构更为复杂,导致网络传输速率下降和等待时间加长,从而使得网络拥塞。网络的拥塞又使得人们不停的改进网络协议和操作系统、增加网络带宽、增加和优化网络资源,以利于网络更为有效合理的使用^[1-3]。

在各种不同的网络上对现有互联网络业务量进行实验研究和数据测量,如 ON/OFF 周期和过程的测量^[4,5]、ping 的时间统计^[6,7]、单个路由器的负载测量和统计^[8,9]等等,并进行相关的数据分析,其目的是为更好的理解计算机互联网络的特征,进而有效管理和控制网络,使之高速有效运行。Willinger 等人^[4,8]发现网络业务量呈现自相似的特性,并提供了一个简单的物理解释,即有大量重拖尾的 ON/OFF 过程的叠加,使得业务量呈现自相似的特性。Huberman 和 Lukose^[2]讨论了人为因素对网络业务量的影响。Csabai^[6]以及 Takayasu 等人^[7]用 ping 时间序列来刻画类似 Internet 这类非平衡系统,即测量数据包的 RTT(Round Trip Time)通过分析功率谱来描述网络

业务的统计特性,用数据包的平均传输时间来区分网络运行的自由流和拥塞相两种相态。

基于已有网络业务量的测量数据,Yuan 等人^[10,11]用元胞自动机模型来模拟网络数据的传输,在周期边界条件下刻画了有瓶颈和没有瓶颈情况下吞吐量的动态特性,没有分析数据包的 RTT 等其他特征。Huisinga 等人^[12]应用随机过程中的非对称简单排斥过程(Asymmetric Simple Exclusion Process,ASEP)理论来描述数据包在网络的传输过程,数据包沿着有源节点到目的节点的固定路径进行传输,同时考虑了路由节点的缓存大小,每个路由节点均以一个较小的概率往下一个路由节点发送数据包。

本文考虑考虑了路由器的缓存大小,在非周期边界条件下,基于元胞自动机模型,模拟网络中数据包沿着由信息源到目的主机的固定路径的传输情况,考虑了路由节点的缓存大小,在自由和有瓶颈阻塞情况下,对数据包的传输时间和缓存区的排队长度进行了仿真和分析,发现路由节点的排队长度和传输时间在自由流相态呈现出典型的幂律特性,而在拥塞相态下排队长度呈现白噪声特征,传输时间在低频段近似为幂律、高频段近似为白噪声特征。其结果和经验数据的统计特性相符。

2. 模 型

在计算机互联网络(Internet)传输的数据文件被分成某些有限大小的数据包,这些数据包在业务源

和目的主机之间传送。数据包在传输过程中遵循 TCP/IP 协议，沿着空间固定的路由节点连接组成的路径被传送到目的主机。对于路由节点来说，它有一个有限大小的缓存区来接收和存放其他路由节点发送来的数据包，并且以某个容许速率 v 往其他路由节点传输其缓存区存放的数据包。在缓存区已满的情况下，该路由节点不再接收其他路由节点发送来的数据包。因而，业务源和目的主机之间的数据文件

传输可以看作一个一维过程。同时，对于多个业务源共享某些空间固定的路由节点往目的主机发送数据文件，仍然可以将它看作一个一维过程。因此，可以通过研究这些路由节点组成的一维连接的特性来讨论互联网络的业务问题，如网络的特性分析以及控制与管理等等。为了分析互联网络业务的统计特性，我们引入一种非周期边界条件的元胞自动机模型，其结构如图 1 所示，为一个开放的、非保守的系统。

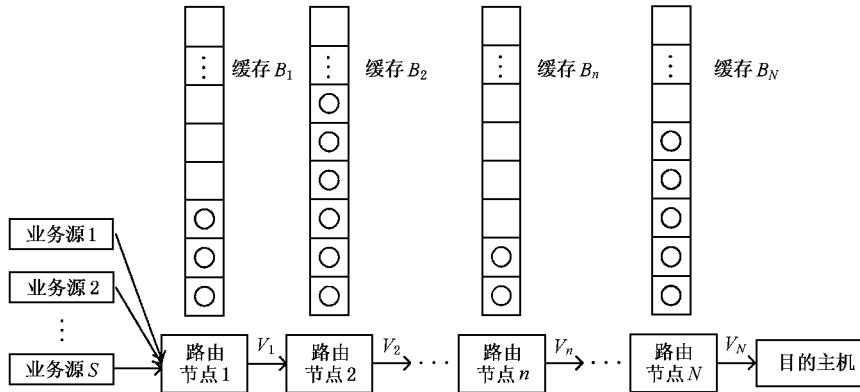


图 1 基于元胞自动机的数据包传输系统模型

该模型是由 N 个路由节点组成的一维连接队列。图 1 中方格表示缓存单元，方格中的圆圈表示缓存单元中存放有数据包。每个路由节点 n 有一个大小为 B_n 个缓存单元的缓存器，可容纳 B_n 个数据包。同时设该路由节点存放的数据包为 C_n ，显然有 $C_n \leq B_n$ 。路由节点 n 以速率 v_n 往下一路由节点发送数据包，要求 $v_n \leq C_n$ 且 $v_n \leq B_{n+1} - C_{n+1}$ （即要求下一路由节点非满）。同时还要考虑该路由节点上一时刻发送数据包的速率和网络的随机扰动，该扰动是由用户心理状态以及其他外在因素等原因而导致的网络额外开销部分。这里设其以某个固定概率 p_n 产生，概率 p_n 和路由节点的负载情况相互独立。各路由节点接收和发送数据包以等间隔离散时步进行演化和同步更新，数据包的传输时间（Travel time） T_n 每隔一时步增加一单位时间。对路由节点 1，有 S 个业务源以某种概率分布向其发送数据包，如果发送的数据包大于路由节点 1 空闲的缓存空间数，则多余部分将被丢弃。这里选取以均值和幅度均为 J_{in} 的均匀分布作为路由节点 1 接收的数据包数。对路由节点 N ，其目的主机的容量可设为足够大，对路由节点 N 缓存中的数据包能全部接受。

假设在 $t = 0$ 时刻，所有路由节点缓存中的数据

包数全为零，即有 $C_n(t=0) = 0$ ($n = 1, 2, \dots, N$)；同时，所有路由节点的发送速率全为零，即有 $v_n(t=0) = 0$ ($n = 1, 2, \dots, N$)。这样，所有路由节点的状态并行更新包含以下四个步骤：

1) 若路由节点 1 缓存空间在 t 时刻没有被完全占满，按确定的分布随机产生 J_{in} 个数据包，插入其中若干个数据包，使得路由节点 1 存放的数据包数为： $C'_1(t+1) = \min\{C_1(t) + J_{in}, B_1\}$ 。并设所有新插入的数据包传输时间为零，即有 $T_1 = 0$ 。

2) 对于路由节点 $n = 1, 2, \dots, N-1$ ，按到达该路由节点的顺序取出若干数据包，使得路由节点 $n+1$ 中存放的数据包数为： $C'_{n+1}(t+1) = \min\{C_{n+1}(t) + \min\{C_n(t), v_n(t) + 1\}, B_{n+1}\}$ ，即路由节点 n 的发送速率为 $v_n(t+1) = C'_{n+1}(t+1) - C_{n+1}(t)$ 。对路由节点 N ，设其目的主机的容量足够大，能接受路由节点 N 缓存中的所有数据包，即有 $v_N(t+1) = \min\{C_N(t), v_N(t) + 1\}$ 。

3) 对于中间路由节点 $n = 1, 2, \dots, N$ ，当其发送速率大于零时，以一定的概率 p_n 使得发送速率 $v_n(t+1)$ 减 1，即 $v_n(t+1) \rightarrow v_n(t+1) - 1$ 。这样路由节点 $n = 1, 2, \dots, N$ 同步更新后的缓存数据包数为 $C_n(t+1) = C'_n(t+1) - v_n(t+1)$ 。

4) 路由节点 $n = 1, 2, \dots, N$ 的缓存中, 所有数据包传输时间都增加一单位时间, 即有 $T_i = T_i + 1$.

其中, $v_n(t)$ 表示节点 n 在 t 时步的发送速度, 即 t 时步发送的数据包数; $C_n(t)$ 表示节点 n 在 t 时步时的缓存中的数据包数; $C_{n+1}(t+1)$ 为中间计算量, 表示节点 $n+1$ 在 $t+1$ 时步不向后发送时缓存中可能的最大数据包数.

步骤 1) 描述了元胞自动机模型中数据包的产生规则, 步骤 2), 3) 和 4) 给出了各路由节点的同步更新规则. 步骤 2) 融合了一般元胞自动机模型^[13]中的步骤 1 和 2), 并且要求传输速率在容许范围内尽可能大且接近上一时步的传输速率. 步骤 3) 考虑了路由节点发送数据包时的随机性扰动因素.

注意, 缓存区中的数据包按在此缓存中等待时间的长短顺序发送, 等待时间长的数据包会被优先发送给下一路由节点, 即先入的数据包先出. 这和网络中数据包的实际传输情况相符. 由于同步更新, 故每一时步每个数据包只能移动一次或者不移动.

互联网络中的相变^[14-16]问题, 近来为网络动力学^[17]中的一研究热点, 已有文献从数据包流密度^[9, 16]、节点的排队长度^[13]以及数据包 RTT 时间^[6, 9]等方面进行了讨论. 文献[12]通过比较系统输入数据包数量和单个路由节点的平均最大容量来区分系统的自由流和拥塞状态. 类似的, 本文通过比较输入数据包数量和单个路由节点数据包的平均最大传输速率, 来判断系统的拥塞和自由流状态. 当系统输入数据包数量小于路由节点数据包的平均最大传输速率时系统处于自由流状态, 当系统输入数据包数量大于路由节点数据包的平均最大传输速率时系统处于拥塞状态, 二者相等时处于平衡态.

3. 仿 真

我们首先对图 1 所示的系统模型进行仿真模, 来研究其典型现象与行为特征.

图 2 给出了数据包传输时间与系统时间的关系曲线, 横轴系统时间, 纵轴表示数据包的传输时间. 其中参数 $N = 15$, $J_{in} = 32$, $B_n = 128$, $p_n = 0.2$, $n = 1, 2, \dots, N$. 由于缓存空间 $B_n = 128$ 较数据包注入速率 $J_{in} = 32$ 大得多, 系统处于自由流状态. 该曲线去掉了前面 100000 个过渡时步后得到的, 并且按数据包到达次序等间隔的抽取出其传输时间.

图 3 给出在有一个瓶颈路由节点(该节点缓存

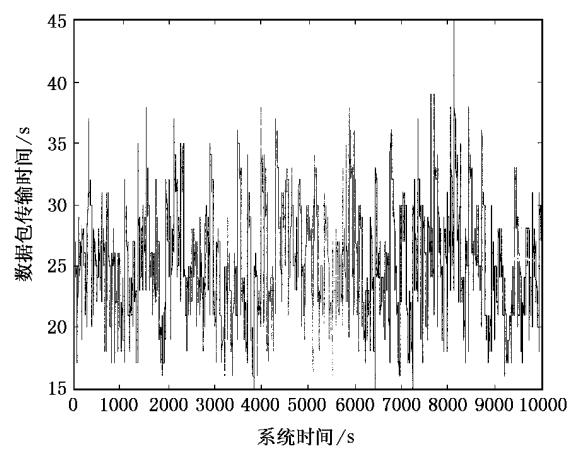


图 2 自由流时数据包传输时间与系统时间的关系曲线

空间相对较小)情况下数据包传输时间与系统时间的关系曲线. 图 3 中除最后一路有节点最大缓存为 8 外, 即 $B_{15} = 8$, 其他参数均与图 2 相同. 由于缓存空间 $B_{15} = 8$ 明显较数据包注入速率 $J_{in} = 32$ 小得多, 瓶颈路由节点的存在使得系统处于拥塞状态, 不再为自由流状态.

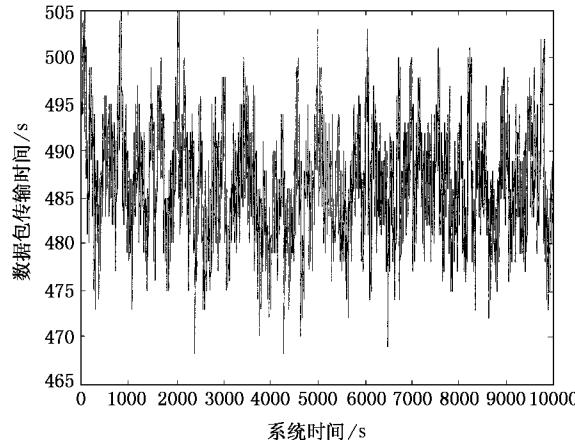


图 3 拥塞时数据包传输时间与系统时间的关系曲线

比较图 2 和图 3, 可以看到有瓶颈路由节点情况下系统拥塞, 从而使得数据包平均传输时间大大增加, 其平均传输时间约为自由流情况下的 18 倍.

单个路由节点数据包的最大传输速率为: $v_n^{max,r} = B_n$. 设路由节点的平均最大传输速率为 v_n^{max} , 当路由节点数据包的输入速率 j_n^{in} 小于平均最大传输速率时, 即有 $j_n^{in} < v_n^{max}$, 路由节点处于自由流相态. 数据包流在整个路由器组成的一维链中顺序传输, 如果系统输入数据包数量小于所有路由节点数据包的平均最大传输速率时, 路由节点的缓存空间基本都

不满,数据包的传输时间也相对较短,系统处于自由流相态,如图2所示情形.反之,如果系统输入数据包数量大于某个或某些路由节点数据包的平均最大传输速率时,则平均最大传输速率小的路由节点前所有路由节点的缓存空间会慢慢加满,以至拥塞,数据包的传输时间也相对较长,系统处于拥塞状态,如图3所示情形.

系统进入稳态后(即去掉过渡过程),自由流情况下 v_n 近似为 J_{in} ,各节点缓存中的平均数据包数近似为 J_{in} .对于只有一个节点n的缓存 $B_n = B_{min} \ll J_{in}$ 的极端拥塞状态,稳态时系统的平均发送数据包速率近似为 $B_{min}/2$.在节点n之前的节点,其缓存中的平均数据包数近似为 $B - B_{min}/2$ (设其他所有节点缓存均为B),而在节点n之后的节点,其缓存中的平均数据包数近似为 $B_{min}/2$.

路由节点缓存区的排队长度和数据包的传输时间可以反映网络的运行状况,为研究排队长度和传输时间的统计特性,我们分别作出自由流情况下的节点排队长度和传输时间的功率谱图,以路由节点 $n=8$ 为对象,其结果分别如图4和图5所示.其中参数 $N=15$, $J_{in}=32$, $B_n=128$, $p_n=0.2$, $n=1,2,\dots,N$.(其他节点的仿真结果类似)

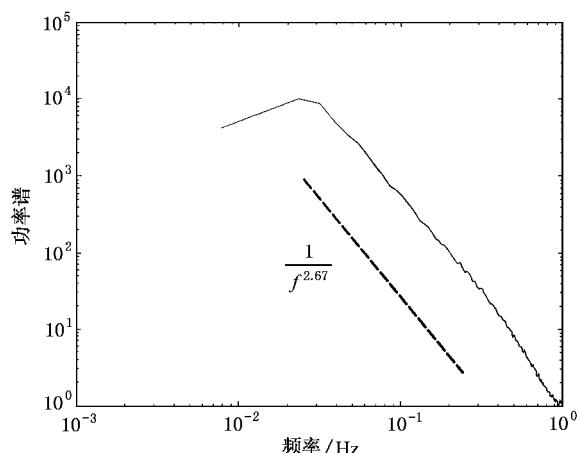


图4 自由流时路由节点 $n=8$ 排队长度的功率谱图

对于拥塞状态,我们也分别作出其排队长度和传输时间的功率谱图,分别如图6和图7所示.除最后一路由节点最大缓存为8外,即 $B_{15}=8$,其他参数均与图4和图5中参数相同.和自由流情况不同的是,排队长度整体上呈现白噪声特性,但传输时间的功率谱却和图5差别较大,在高频段呈现幂律特性,而在低频段类似于白噪声特性.

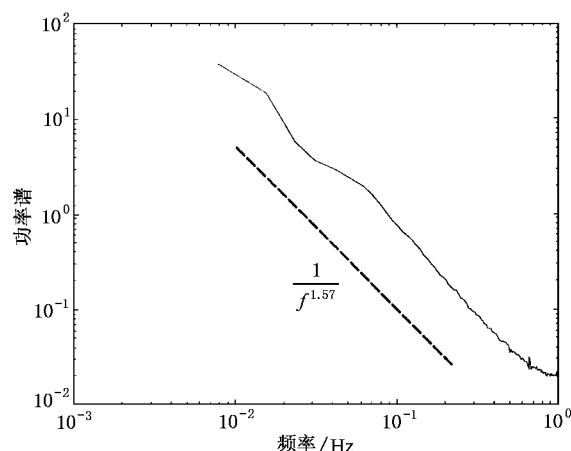


图5 自由流传输时间的功率谱图

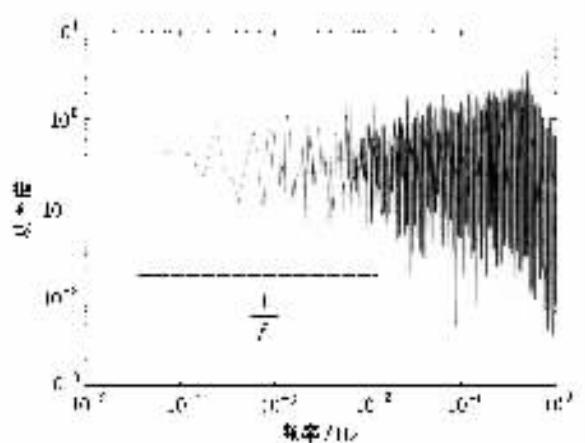


图6 拥塞状态时路由节点 $n=8$ 排队长度的功率谱

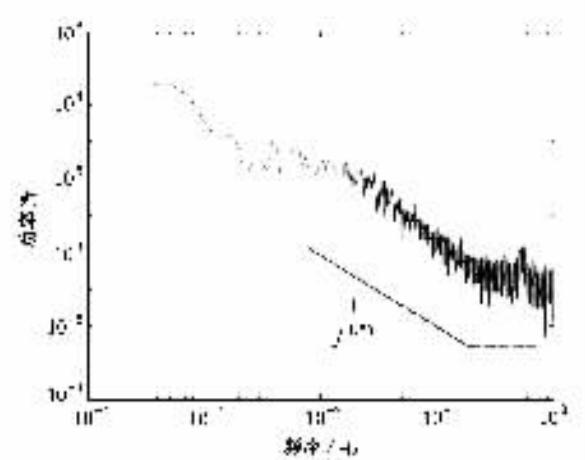


图7 拥塞状态传输时间的功率谱图

从图4和图5可以看出,排队长度和传输时间在自由流相态呈现出典型的幂律行为,即 $\frac{1}{f^\alpha}$ 噪声特

性,预示着较小的排队长度和传输时间以较大的概率发生,较大的排队长度和传输时间以较小的概率发生.其幂指数 α 分别约为2.67和1.57.传输时间的分布呈现幂律,这和已有文献对RTT和ping时间统计上呈现自相似特性是一致的^[6,9].

从图6和图7来看,拥塞时,排队长度呈现典型的白噪声特性,这在直观上是很容易理解的.传输时间在高频段,近似为白噪声特性,而在低频段,近似为幂律特性,且其幂指数约为1.23.这和文献[9]和[12]的结果一致.

通过对系统模型中排队长度和传输时间的功率谱特性分析,我们发现其结论和已有数据测量等得到的结果一致^[9],表明系统模型在一定意义上是相当合理的,可以用来研究复杂互联网络中的数据包流等特性,从而为进一步理解互联网络提供有益的帮助.

4. 结 论

计算机互联网络继续高速发展,已经走向全球化和商业化,其应用越来越广泛,业务种类也不断增加,渗透到人们日常生活的很多方面,对这样一个巨大的复杂网络的管理和控制,并且使之高效安全运

行,已经成为当前面临的一个重要问题.对互联网络中的整体特性,如自相似业务量等,我们还缺乏深入了解,直接寻求复杂模型对网络进行仿真和模拟还不太现实.而某些相应的简单模型,既能反映网络的某些整体上的统计特性,又容易实现,无疑可以被我们用来进行网络整体特性的研究.

本文基于元胞自动机模型,在非周期边界条件下,模拟了互联网络中数据包沿着由信息源到目的主机的固定路径的传输特性,发现路由节点的排队长度和传输时间在自由流相态呈现出典型的幂律特性,而在拥塞相态下排队长度呈现白噪声特征,传输时间在低频段为幂律、高频段为白噪声特征.这些结果和从已有文献和经验数据得到的结论^[6,9]一致,说明了该模型的合理性.

本文工作主要研究了自由流和拥塞相态下,路由节点排除长度和数据包传输时间及其相关特性,将来的工作可以更精确的刻画相变以及参数影响的具体细节情况.为仿真节点同时作为源和目的节点的复杂网络行为,本文模型有必要进一步推广到二维.不过,我们的仿真研究显示,真实互联网络业务的统计特性可以通过这种简单的一维模型来研究和理解.

- [1] Banavar J R, Maritan A and Rinaldo A 1999 *Nature* **399** 130
- [2] Huberman B A and Lukose R M 1997 *Science* **277** 535
- [3] Barabási A L, Albert R, Jeong H and Bianconi G 2000 *Science* **287** 2115a
- [4] Willinger W, Taqqu M S, Sherman R and Wilson D V 1997 *IEEE/ACM Trans. on Networking* **5** 71
- [5] Crovella M E, Bestavros A and Taqqu M S 1998 *A Practical Guide to Heavy Tails: Statistical Techniques and Applications* (Boston: Birkhäuser) 3–25
- [6] Csabai I 1994 *J. Phys. A* **27** L417
- [7] Takayasu M, Fukuda K and Takayasu H 1999 *Physica A* **274** 140
- [8] Leland W, Taqqu M, Willinger W and Wilson D 1994 *IEEE/ACM Transactions on Networking* **2** 1
- [9] Takayasu M, Takayasu H and Sato T 1996 *Physica A* **233** 824
- [10] Yuan J, Ren Y and Shan X 2000 *Phys. Rev. E* **61** 1067
- [11] Yuan J, Ren Y and Shan X M 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 398 [in Chinese] 袁 坚、任 勇、山秀明 2000 物理学报 **49** 398]
- [12] Huisenga T, Barlovic R, Knosepe W, Schadschneider A and Schreckenberg M 2001 *Physica A* **294** 249
- [13] Nage K and Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I France* **2** 2221
- [14] Tretyakov A Yu, Takayasu M and Takayasu H 1998 *Physica A* **253** 315
- [15] Yuan J, Ren Y, Liu F and Shan X M 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1221 [in Chinese] 袁 坚、任 勇、刘 锋、山秀明 2001 物理学报 **50** 1221]
- [16] Takayasu M, Takayasu H and Fukuda K 2000 *Physica A* **277** 248
- [17] Huberman B A and Adamic L A 1999 *Nature* **401** 132

A simple cellular automata model for packet transport in the Internet

Liu Feng Ren Yong Shan Xiu-Ming

(Department of Electronics Engineering , Tsinghua University , Beijing 100084 , China)

(Received 6 September 2001 ; revised manuscript received 29 October 2001)

Abstract

A simple cellular automata model of data packets transport process in the Internet is presented. We study the statistical characters about length of router packet queues and travel time of data packets along a fixed path in the networks. Computer simulations reveal there are free flow and congested phase in the networks , by difference of inject and transport velocity about data packets in the router node. In free flow phase , power law exists in power spectrum of both packet queues and travel time. In congested phase , power spectrum of packet queues in router node can be characterized by white noise , but power spectrum of travel time are approximately characterized by power law at low frequencies and white noise at high frequencies . The simulation results accord with the research conclusion reported and experimental data.

Keywords : cellular automata , $1/f$ noise , power law , computer network

PACC : 0540 , 0560