

复杂计算机网络中的相变和整体关联行为

袁 坚 任 勇 刘 锋 山秀明

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

(2000 年 6 月 25 日收到, 2001 年 2 月 5 日收到修改稿)

利用相变的概念解释复杂计算机网络中广泛存在的幂律现象, 并未考虑到网络这一复杂系统中节点之间的相互关联作用. 通过一种计算机网络模型, 对网络中的相变和整体关联行为进行了分析和比较. 研究表明, 随着负载的增加, 网络节点行为的空间和时间的长程相关性逐渐增强, 整体关联行为逐渐显现. 在临界状态, 网络负载变化的功率谱呈现 $1/f^2$ 的特点, 而节点排队长度变化的功率谱服从 $1/f^\alpha$ 分布, 其中 $\alpha \leq 2$. 网络节点行为在时间和空间上的关联进一步得到说明.

关键词: 计算机网络, 相变, 关联, 幂律

PACC: 0540J, 8980H

1 引 言

计算机互连网络(Internet)发展到今天, 已经形成了一个庞大的复杂的系统. 其具体的复杂性表现为: 系统的规模和用户的数量巨大且仍在不断增长; 网络协议体系庞杂服务质量体系(QoS)多等级; 网络结构呈现分布式、多层次; 业务的突发性; 节点间以及节点与数据包流之间由于协议而产生的非线性作用; 用户之间合作与竞争等等. 在应用的牵动下, Internet 的规模和技术正在不断发展之中^[1].

面对 Internet 这样一个复杂的网络系统, 如何控制和管理使其良好地运行, 传统的研究方法过于强调孤立节点或单业务连接等局部性能的优化, 忽略了对系统整体行为以及相应控制和管理策略的研究. 另一方面, 从网络协议设计和优化的角度出发, 将绝大部分控制功能置于端系统实现局部性能优化的传统控制机理很难适应大规模、高性能网络发展的要求. 因此, 从系统的整体行为角度对计算机网络进行分析和研究具有重要的理论意义和实用价值. 由于 Internet 的复杂性, 对真实的网络进行仿真模拟无疑困难重重. 因此, 探究计算机网络本质不变性的仿真模拟, 就显得尤为重要.

统计研究发现, 计算机网络中存在广泛的幂律现象, 如业务量的自相似性、数据包延时变化的 $1/f$ 特性, 及处理器利用率的幂律分布等^[2-4]. 而其产生的物理机理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^[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节点所呈现出的相互关系.

最新的研究已经将相变的概念用于解释数据包传输时间和流密度的波动^[6-12]. 研究发现, 网络在低负载到拥塞状态之间的临界点附近处于最有效的状态, 相应的临界现象可用来解释网络中广泛的幂律. 同时, 研究人员也发现存在多个节点是传输时间出现 $1/f$ 特征的必要条件^[13], 并且指出网络节点行为在时间和空间上存在一定相关性^[14]. 在文献 [7, 15] 中, 网络节点行为的整体特性也得到了一定的关注. Ohira 等人研究一种网络模型相变时, 推断路由器的整体特性对相变点的变化起着关键作用. Csabai 早在数年前就呼吁网络研究人员重视交通流研究^[16]的进展, 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, 并指出反映整体行为的模型或许能够较恰当地描述这一现象.

$1/f$ 噪声体现出相关在大时间尺度上的扩展, 显示了某种合作效应的存在. 通过研究一些计算机网络元胞自动机模型, 我们指出了在节点层次和数据包层次, 整体行为表现出自组织临界现象^[1, 17-21]. 自组织临界理论属于整体理论^[22], 即它所描述的总体特性并不取决于微观机制. 大量的作用单元在一定条件下自然地朝一种临界状态演化, 对系统性质的

变化有根本的意义. 本文通过文献 [9] 中研究相变的一种计算机网络模型, 对网络中的相变和整体关联行为进行了分析和比较. 研究表明, 随着负载的增加, 网络节点行为的空间和时间的长程相关性逐渐增强, 整体关联行为逐渐显现. 这一点比相变的理解更进一步, 对计算机网络动态行为的理解有着重要的意义. 在临界状态, 网络负载变化的功率谱呈现 $1/f^2$ 的特点, 而节点排队长度的变化服从 $1/f^\alpha$ 分布, 其中 $\alpha \leq 2$, α 的降低是整体关联行为的一种体现. 网络节点行为在时间和空间上的相关性进一步得到了说明.

这一工作的进一步深入, 将有利于网络拥塞的理解和相应对策的探讨, 有助于网络管理与控制等关键技术的发展.

2 模型与演化步骤

计算机网络的目的是传输以数据包为单元的信息. 数据包从源终端到目的终端要经过一些路由器, 路由器起着中继的作用. 考虑一个二维网络, 如图 1 所示. 针对这类模型, 网络中的每个节点可以是一个终端或一个路由器, 也可以既是终端又是路由器. 边界条件可选择周期的或非周期的. 在文献 [7] 的模型中, 终端分布在网络边沿, 包围在中间的节点全部是路由器, 这种情况下边界条件不可能是周期的. 边沿的终端产生包含目的终端地址的数据包, 经过中间节点中继传输后, 最终达到边沿的目的终端. 终端可以通过同时增大或减少注入数据包速率来调节网络的负载. 如果速率过高, 网络发生拥塞, 速率过低, 网络利用率较低. 两种状态之间的临界状态应该是最优的. 然而, 对该模型进行仿真就不难发现, 被传输的数据包在网络中的分布是不均匀的. 网络的中心会比较拥塞, 四个边角又会比其他靠近边沿的节点拥塞. 针对这一问题, 文献 [9] 和 [12] 分别提出了两种改进模型. 文献 [12] 中的模型, 终端按一定的比例随机地分散在图 1 所示的网络中, 而文献 [9] 中的模型, 网络中的每个节点既是终端又是路由器, 这样的节点既按一定的速率产生数据包, 又起到中继的作用. 以上两种模型可选择周期的或非周期的边界条件. 本文为研究网络节点行为的相关特性, 采用文献 [9] 中的模型, 并选择周期的边界条件.

对图 1 所示网络, 设系统的规模为 L , 则网络有 L^2 个节点. 节点的位置用矢量 r 表示为

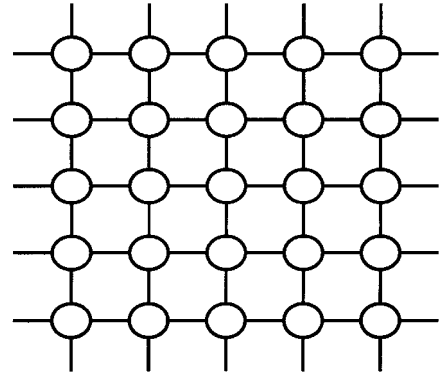


图 1 二维网络简化模型

$$r = ic_x + jc_y, \quad (1)$$

其中 c_x 和 c_y 分别为笛卡尔单位矢量, $ij = 1, \dots, L$. 每个节点最邻近四个节点的集合表示为

$$\mathcal{C}(r) = \{r - c_x, r + c_x, r - c_y, r + c_y\}, \quad (2)$$

各个节点在每一时步上以一定概率 p 产生包含目的节点地址的数据包. 经过中间节点中继传输后, 最终达到目的节点. 各节点都有一个缓存区, 将来不及转发的数据包暂存, 每一时步各节点将排在缓存区最前面的一个数据包传送到 $\mathcal{C}(r)$ 中之一. 若数据包已达到目的节点, 则就此消亡. 若节点 r 在时步 k 的排队长度为 $n(r, k)$, 则该时步上网络中数据包的总和为

$$N(k) = \sum_r n(r, k), \quad (3)$$

对每个节点而言, 都想以最短的路径传送数据包, 于是就要在 $\mathcal{C}(r)$ 中找一个离目的节点距离最近的. 对两个节点 $r_1 = (i_1, j_1)$ 和 $r_2 = (i_2, j_2)$, 在周期的边界条件下, 用

$$d_p(r_1, r_2) = L - \left| |i_2 - i_1| - \frac{L}{2} \right| - \left| |j_2 - j_1| - \frac{L}{2} \right| \quad (4)$$

作为距离测度. $\mathcal{C}(r)$ 中离目的节点距离最近的可能不止一个, 这种情况下选择排队长度最短的, 而若排队长度又相同, 则随机地选取其中之一.

3 实验结果

对网络资源的需求一旦超过了网络所能提供的限度, 就会导致网络性能的下降和拥塞的发生. 先考虑多个终端共享一个路由器的情况. 数据包从源终端经过路由器到达目的终端, 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,造成溢出.路由器最有效的状态,应该是输入的数据包正好保持路由器以最大的吞吐量传输,这样的一种临界状态.针对这种情况,文献[8]专门作了理论分析,指出路由器排队长度的变化在临界状态呈现布朗运动的规律,功率谱表现为 $1/f^2$ 的特点.这其实就对应图1和图3中 $L=1$ 的情况.

对于 $L>1$ 的情况,将网络当作一个黑盒子,观察网络中数据包总和 $N(k)$ 的变化.各节点在每一时步上以一定概率 p 产生数据包, p 越大,数据包注入网络的速率越高,网络内积累的待传数据包就越多.当 p 大到一定数值 p_c 以上,注入网络的数据包数量变得大于离开网络的数据包数量时, $N(k)$ 会持续增加,网络将越来越拥塞.当 $p < p_c$ 时,注入网络的数据包数量与离开网络的数据包数量保持平衡.当 $p = p_c$ 时,对应前两种状态之间的临界状态.仿真结果表明,在临界状态, $N(k)$ 变化的功率谱仍表现为 $1/f^2$ 的特点.这一点与 $L=1$ 情况下的理解是一样的.

以上的情况体现了计算机网络中的相变.文献[10]中,进一步将Internet的动态行为理解成各节点在相变点的行为的总体表现.以下将从各节点行为的相关性入手,探讨网络的整体关联行为.

在计算机网络分析中,Kleinrock独立假设^[23]一直起着主导作用.该假设把所有节点的输入过程都当作是相互独立的.这样一来网络分析的难度大为降低.而在网络中,一连串数据包进入某个节点,经排队处理后转发出去,又变为下一个节点的输入.显然,这两个输入过程在数量上和时间上是相关的.本文定义相关参数

$$C_{i,j} = \frac{COV(i,j)}{\sqrt{D(i)D(j)}} \quad (5)$$

来体现节点行为的相关性.其中

$$COV(i,j) = E[n(i)n(j)] - E[n(i)]E[n(j)] \quad (6)$$

为节点 i 和 j 之间排队长度 $n(i)$ 和 $n(j)$ 的互协方差, $D(i)$ 和 $D(j)$ 分别为 $n(i)$ 和 $n(j)$ 的方差.

节点之间相关行为是通过彼此间相互传递数据

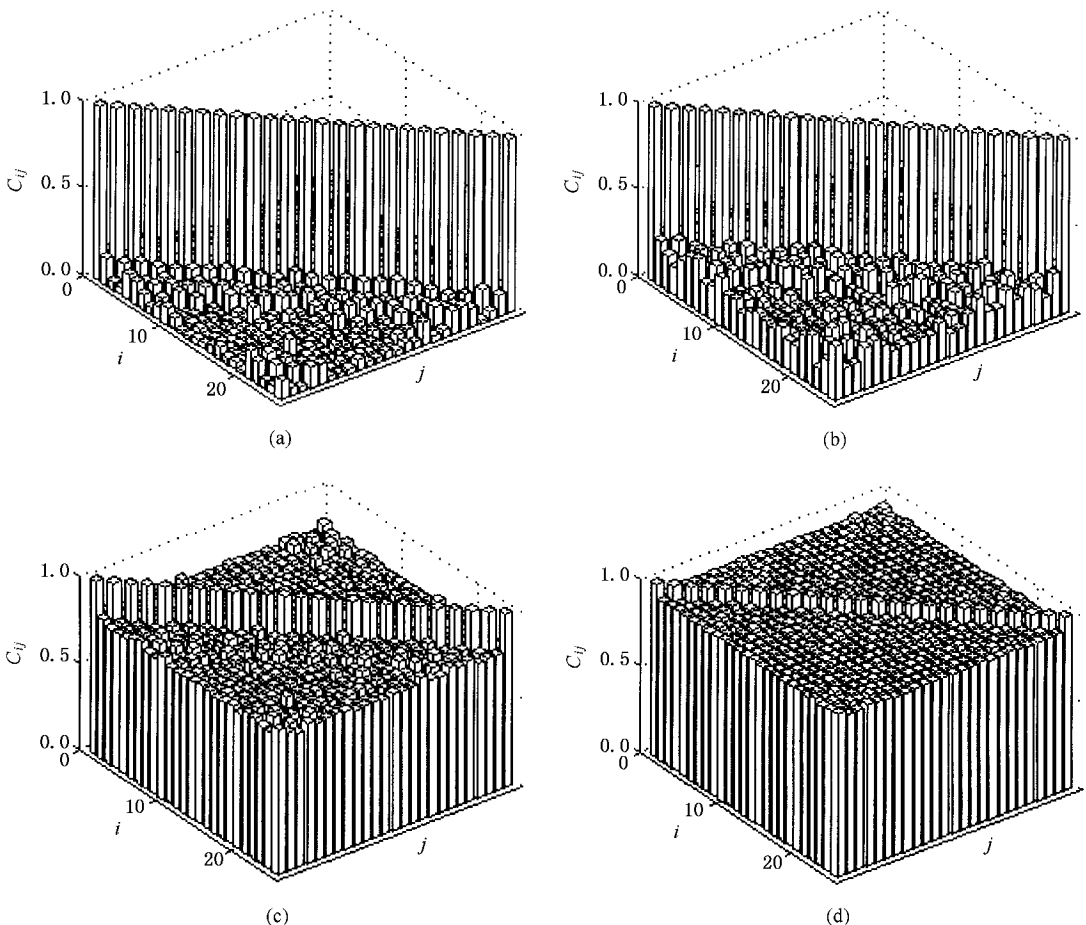


图2 对于 $L=5$ 的网络 (a) $p=0.250$ (b) $p=0.275$ (c) $p=0.285$ 和(d) $p=0.286$ 时的相关参数矩阵

包产生的. 当 p 较小时, 节点行为相互之间影响较小, 相关性较弱. 对于 $L = 5$ 的网络, $p = 0.250$ 时的相关参数矩阵如图 2(a) 所示. 相关参数矩阵是一个 $L^2 \times L^2$ 的矩阵, 表示的是所有 L^2 个节点之间的相关参数. 对角线相关参数为 1, 表示的是自相关, 而节点行为的互相关较弱. 当 p 增大至 0.275 时, 相应的相关参数矩阵如图 2(b) 所示. 可以看出, 随着传递数据包数量的增多, 节点行为的互相关有所增强. 当 p 增大至 0.285 时, 节点行为的互相关已经较强, 如图 2(c) 所示. 当 p 增大至 $p_c = 0.286$ 时, 节点行为的互相关联很强, 如图 2(d) 所示. 以上过程可以看出, 随着 p 的增大, 全局的相关性逐渐增强, 整体关联行为逐渐显现. 这一点比相变的理解更进一步, 对计算机网络动态行为的理解有重要的意义.

节点行为的关联, 也体现在各节点排队长度的变化上. 在临界状态, 网络中数据包总和 $N(k)$ 变化的功率谱表现为 $1/f^2$, 那么网络中各节点排队长度的变化规律又是怎样呢? 随着系统规模的增大, 网络中节点的数目不断增多, 数据包从源终端需经过更多的节点才能到达目的终端. 而临界概率 P_c 却随 L 的增大而降低, 降低了单个节点由数据包注入和消亡对网络整体行为的影响, 排队长度的变化会

更依赖于网络中的其他节点. 在不同的系统规模 $L = 1, 3, 9$ 和 27 情况下, 临界状态节点排队长度变化的功率谱服从 $1/f^\alpha$ 分布, 其中 $\alpha \leq 2$. 随着系统规模的增大, α 从 $L = 1$ 时的 2 降低到 $L = 27$ 时的 1.33. α 的降低是整体关联行为的一种体现. 同时, 由图 2 和图 3, 网络节点行为的空间和时间上的长程相关性也进一步得到了说明.

4 结论与讨论

目前 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. 从发展趋势来看, Internet 必须支持多种业务, 应该有对不同应用提供不同等级服务的机理. Internet 将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, 网络管理与控制的重点应该从终端用户转移到网络本身. 然而, 目前对网络这一复杂系统的动态行为尚知之甚少, 采用何种新的节点策略和网络结构并考虑系统改进带来的影响, 在目前情况下, 无疑是一个巨大的挑战. 网络动力学是一个新的跨学科领域, 如何从动力学角度, 将元胞自动机、神经网络、 L -系统、自组织有序化、适应性、目的性、主动性、协同和竞争等理论和方法应用于网络, 目前的研究还远未成熟. 无论如何, 借鉴统计力学和复杂性理论研究的最新进展, 可以更好地理解网络的复杂动态行为. 该研究的进一步深入, 将有利于网络拥塞的理解和相应对策的探讨, 将有助于网络管理与控制等关键技术的发展.

本文通过研究一种计算机网络模型, 对网络中的相变和整体关联行为进行了分析和比较. 研究表明, 随着负载的增加, 网络节点行为的相关性逐渐增强, 整体关联行为逐渐显现. 这一点比相变的理解更进一步, 对计算机网络动态行为的理解有重要的意义. 在临界状态, 网络负载变化的功率谱呈现 $1/f^2$ 的特点, 而节点排队长度的功率谱变化服从 $1/f^\alpha$ 分布, 其中 $\alpha \leq 2$, α 的降低是整体关联现象的一种体现. 网络节点行为的空间和时间上的长程相关性进一步得到了说明.

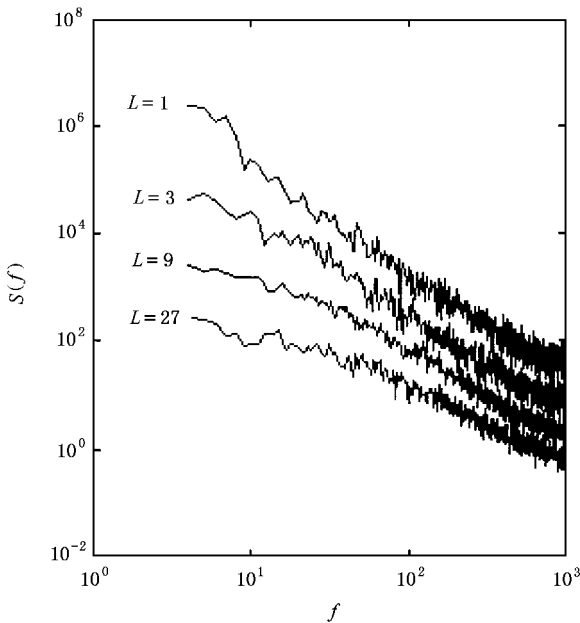


图 3 在不同的系统规模 $L = 1, 3, 9$ 和 27 情况下, 临界状态节点排队长度变化的功率谱密度

- [1] J. Yuan , Y. Ren , X. Shan , *Phys. Rev.* , **E61**(2000) , 1067 .
- [2] W. Willingersm , V. Paxson , *Notices of the American Mathematical Society* **A5**(1998) 961 .
- [3] J. M. Carlsons , J. Doyler , *Phys. Rev.* , **E60**(1999) , 1412 .
- [4] M. Harchol-Balter , M. Crovellas , C. MuHa , *Lecture Notes in Computer Sciences No. 1469. Computer Performance Evaluation , Modelling Techniques and Tools* (Springer-Verlag , Berlin , 1998) , p. 231 .
- [5] W. Willinger , M. S. Taqqu , R. Shennan , D. V. Wilson , *IEEE/ACM Transactions on Networks* , **5**(1997) , 71 .
- [6] A. Y. Tretyakov , H. Takayasu , M. Takayasu , *Physica* , **A253**(1998) 315 .
- [7] T. Ohira , R. Sawatari , *Phys. Rev.* , **E58**(1998) , 193 .
- [8] M. Takayasu , A. Y. Tretyakov , K. Fukuda , H. Takayasu , *Traffic and Granular Flow 97* (Springer , Singapore , 1998) p. 57 .
- [9] H. Fuks , A. T. Lawniczak , *Mathematics and Computers in Simulation* **51**(1999) , 101 .
- [10] M. Takayasu , K. Fukuda , H. Takayasu , *Physica* , **A274**(1999) , 140 .
- [11] M. Takayasu , H. Takayasu , K. Fukuda , *Physica* , **A227**(2000) , 248 .
- [12] R. V. Sole , S. Valverde , *Physica A* , Submitted .
- [13] M. Takayasu , H. Takayasu , T. Sato , *Physica* , **A223**(1996) 824 .
- [14] K. Fukuda , M. Takayasu , H. Takayasu , *Fractals* , **7**(1999) 23 .
- [15] I. Csabai , *J. Phys.* , **A27**(1994) , L417 .
- [16] D. Chowdhury , L. Santen , A. Schadschneider , *Physics Reports* , **329**(2000) , 199 .
- [17] J. Yuan , Y. Ren , X. M. Shan , *Acta Physica Sinica* **49**(2000) , 398 (in Chinese 袁 坚、任 勇、山秀明 , *物理学报* , **49**(2000) 398] .
- [18] J. Yuan , Y. Ren , X. M. Shan , *Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Modelling and Simulation* , ed. M. H. Hamza (IASTED/Acta Presss Cairns , Australia , Sep. 1 - 3 , 1999) p. 191 .
- [19] W. Wu , J. Yuan , X. M. Shan , Y. Ren , *Proceedings of ICCT ' 2000* , ed. K. Gong , Z. S. Niu (Publishing House of Electronics Industry , Beijing , 2000) p. 70 .
- [20] J. Yuan , Y. Ren , X. M. Shan , *Chinese Physics* , **9**(2000) 641 .
- [21] J. Wu , Z. M. Feng , J. Yuan , *Electronics Letters* , **35**(1999) , 1513 .
- [22] P. Bak , C. Tang , K. Wiesenfeld , *Phys. Rev.* , **A59**(1988) , 364 .
- [23] L. Kleinrock , *Queueing System* , Vol. II : Computer Applications (Wiley , New York , 1976 ,) p. 322 .

PHASE TRANSITION AND COLLECTIVE CORRELATION BEHAVIOR IN THE COMPLEX COMPUTER NETWORK

YUAN JIAN REN YONG LIU FENG SHAN XIU-MING

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

(Received 25 June 2000 ; revised manuscript received 5 February 2001)

ABSTRACT

Some researchers used the conception of phase transition to explain ubiquitous power laws in the complex Internet. However, this explanation obviously ignores the correlation between nodes' behaviors. In this paper, we compare the phase transition with the collective correlation behaviors of nodes by use of a computer network model. It is shown that when the load of network is increased, the spatial and time correlation between nodes' behaviors is also strengthened and the collective correlation phenomenon emerges gradually. At the critical state, the system load fluctuates with a $1/f^2$ power spectrum, and the power spectra of buffer contents fluctuations vary as $1/f^\alpha$ noise where $\alpha \leq 2$. The existence of spatial-temporal correlation among nodes' behaviors is further demonstrated.

Keywords : computer network , phase transition , correlation , power-law

PACC : 0540J , 8980H