

文章编号: 1000-5013(2012)04-0396-05

基于局部信息的加权无标度网络改进路由策略

刘漳辉, 汤振立, 郭文忠

(福州大学 数学与计算机科学学院, 福建 福州 350108)

摘要: 针对现有路由策略的不足, 提出一种新的基于网络局部信息的路由策略. 利用网络节点在网络中的局部邻居节点的静态信息, 引入网络节点队列的动态信息来进行路由选择, 节点在对数据包进行路由选择时能正确根据网络静态信息和实时动态信息进行路由. 仿真实验证明提出路由策略的有效性, 即当控制参数 $\alpha = -1.0$ 时, 网络中的负载均匀分布在各个节点上, 而不会拥挤在度大的节点, 从而有效抑制了网络拥塞.

关键词: 无标度; 通信网络; 路由策略; 拥塞; 网络容量; 节点强度

中图分类号: TP 393.01

文献标志码: A

大型基础设施网络都是节点数量庞大, 连接密度大的网络, 人们对这些关乎国计民生的具有无标度特性的大型基础设施网络传输效率提出了越来越高的要求. 通信网络上最重要的动力学过程是数据传输^[1-4], 而一旦因为数据传输过程中出现拥塞, 将急剧增加数据传输时间及降低网络的性能. 通信网络如电话网、万维网和因特网等都呈现出无标度特性^[5], 如何提高这些网络容量吸引了很多学者的兴趣. 在一个具有异质性度分布网络中, 拥塞最先发生在枢纽节点(通常它们具有最大负载或者最大介数^[6])上, 然后很快延续到整个网络. 因此, 分配较高的容量给具有较大负载的节点, 可以快速提高整个网络的吞吐量^[7]. 正如最短路由策略, 假设给每个节点分配一个容量, 网络吞吐量可以通过优化网络结构来大幅度提升, 如采用模拟退火策略^[8], 或者简单的移除度值大的节点之间的连边^[9]. 尽管可以增加效率, 但是改变节点容量或者改变网络结构的代价都是巨大的或者不允许的, 因此学者们花更多的精力在研究改进路由策略上, 如文献[10]提出了一种基于网络局部可见度的路由策略; 文献[11]提出了一种对于提升网络信息处理能力有巨大作用的有效路径路由策略. 在均匀网络下的拥塞控制研究已有不少学者研究过^[12-13]. 然而, 现实网络中大量网络如万维网、因特网等都呈现无标度特性, 并且网络中的边之间有不同的权值, 因此对加权无标度网络上的路由策略研究具有更深远的实际意义. 本文研究复杂网络上的路由策略, 提出减轻网络拥塞的方法.

1 信息流模型及其路由选择策略

1.1 加权无标度网络模型

路由策略本身没有导致拥塞的发生, 它只是为数据包选择一条传递路线. 当网络发生拥塞时, 差的路由策略会进一步加剧网络拥塞, 而好的路由策略可以在不改变底层基础架构的情况下提高网络信息处理效率. 通过设计好的策略, 如利用局部拥塞信息, 将发生拥塞的节点上的数据包重分布到其他节点上去, 阻止拥塞的加剧. 因此, 人们都倾向于选择有效路由策略.

文中采用的权重和拓扑共同进化的加权无标度网络模型是由 WANG 等^[14]提出的. 该模型生成的网络中节点的度、强度边的权重等特征量都服从幂律分布, 并且与真实网络的统计结果相符合. 该模型从具有 m_0 个节点的完全图开始(每条边权重设为 1), 按以下规则进化.

收稿日期: 2012-03-22

通信作者: 刘漳辉(1972-), 男, 高级工程师, 主要从事高性能计算与云计算的研究. E-mail: lzh@fzu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61103175); 福建省科技创新平台计划项目(2009J1007); 福建省教育厅科技计划项目(JA10052, JK2011002)

1) 权重进化. 每一时间步, 节点 i 和 j 之间的权重 $w_{i,j}$ 以概率 $P_{i,j}$ 增加 1, 即

$$w_{i,j} \rightarrow w_{i,j} + 1,$$

$$P_{i,j} = W p_{i,j} = W \frac{s_i s_j}{\sum_{a < b} s_a s_b}.$$

其中: s 为节点的强度.

2) 拓扑生长. 每一时间步, 新节点 n 以 m 条边(每条边的初始权重为 1)连接到网络中, 连接到节点 i 的概率为

$$\Pi_{n \rightarrow i} = \frac{s_i}{\sum_j s_j}.$$

其中: j 为任意节点.

该模型共运行 $N - m_0$ 个时间步, N 为网络的节点数. 根据以上进化规律生成的网络, 节点强度的概率分布 $P(s) \sim s^{-\theta}$, $\theta = 2 + \frac{m}{m+2W}$. 节点度的概率分布 $P(k) \sim k^{-\gamma}$, $\gamma = c(\theta - 1) + 1$, $c > 1$.

1.2 信息流模型

在现实因特网自治层网络中, 路由器依据事先已经计算出来的可行最短路径策略传递数据包. 当网络规模比较小时, 计算所有节点之间的最短路径是可实现的. 因此, 路由器可以使用已计算好的固定的路由表信息来处理数据包. 任意一对节点对之间可能存在多条最短路径, 因此, 可以随机选择一条并把它存储到固定的路由表中. 然而, 在大型的通讯系统中, 获取所有网络节点的信息是不切实际的, 计算每一节点对之间的最短路径时间复杂度太高, 并且在节点度大的核心节点处应用最短路径策略很容易导致网络拥塞. 基于上述问题, 提出一种基于邻居节点度和信息队列长度信息的有效路由策略. 这种策略兼顾网络静态信息和网络动态信息, 从而有效为数据包寻找最适合的路由路径.

采用的网络信息模型描述如下: 给定一个加权 Barabasi-Albert (BA) 无标度网络, 假定网络中的每一个节点都具有和路由器一样的功能, 可以路由、传递包和接收包. 在每一个时间步, 系统产生 R 个数据包, 选取每个数据包的源节点和目的节点且保证源节点和目的节点不一样. 一个节点 i 在每一个时间步内最多向其邻居节点发送 V_i 个数据包. 每一节点的数据包队列长度无限长, 数据包按照先进先出 (FIFO) 的规则传递.

网络从自由态到拥塞态的连续相变发生在临界数据产生率 R_c 处. 整个网络的通信能力用序参量 H 来定量描述该过程, 即

$$\eta(R) = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{C}{R} \cdot \frac{\langle \Delta W \rangle}{\Delta t} \right). \quad (1)$$

式(1)中: $\Delta W = W(t + \Delta t) - W(t)$, $W(t)$ 为 t 时刻网络中数据包的个数, ΔW 则表示在 Δt 内网络中数据包的变化.

如果 $R < R_c$, 网络处于自由态, 在一个时间步内所产生的信息包数目刚好等于被移除的数据包数目; 如果 $R > R_c$, 网络将进入拥塞态, 大多数数据包将在系统中不断滞留累加, 只有少数数据包可以到达目标节点, 并最终导致整个系统的崩溃. 使用式(1)给出序参数 (order parameter) 来刻画网络的这种状态转换, 对应不同的路由策略, 使得 $\eta(R) = 0$ 的 R_c 亦不一样. 文中使用 R_c 来度量网络的整体容量.

1.3 路由选择策略

在把每一个数据包路由到目的节点的过程中, 每一节点都先查询下其邻居节点, 如果邻居节点里有目的节点, 则此数据包直接发送到目的节点; 否则, 就以按如下概率公式

$$\Pi_i = \frac{[(l_i + 1)k_i]^\alpha}{\sum_j [(l_i + 1)k_{i,j}]^\alpha}, \quad (2)$$

将数据包传递到其邻居节点 i . 上式中: l_i 是节点当前缓存队列的长度; $l_i + 1$ 则是为了避免概率等于 0, k_i 是第 i 节点的度; α 是一个调控系数, 如果 $\alpha = 0$, 所有邻居的选择概率相同, 此时策略等价于随机游走路由策略. 计算节点 i 的所有邻居的选择概率后, 接着应用轮盘赌方法选择下一跳节点.

具体选择方法如下:节点 i 的邻居节点 j 的选择概率 $\{p_j, s. t. \mathbf{A}_{i,j} = 1, j = 1, 2, 3, \cdots, n\}$ 把一个圆盘分成 k (k 是节点 i 的邻居节点数) 份, 其中第 j 个扇形的中心角为 $2\pi p_j$. 在进行选择时, 可以假想转动下转盘, 若转盘指针停留在第 j 个扇形中, 则选择 j 节点作为下一个传递节点.

具体实现过程如下: 随机生成一个 $[0, 1]$ 内的随机数 r , 若 $p_1 + p_2 + \cdots + p_{j-1} < r < p_1 + p_2 + \cdots + p_{j-1} + p_j$, 则选择 j 节点作为下一个传递节点. 显然, 如果节点 j 的选择概率越大, 那占圆盘的面积越大, 被选为下一个传递节点的可能性就越大.

文中的选择概率公式比起文献[15]更具有优势. 文献[15]只利用了节点的度信息, 但是文中所做的改进是考虑结合网络动态信息缓存队列和节点度这一静态信息, 以提高整个网络的数据包处理能力与递送能力, 即在式(2)中使用了一个调控系数 α , 通过大量仿真实验寻找一个合适的 α , 进而最大化网络的数据包处理能力.

2 仿真结果及分析

采用文献[14]的方法构造出一个加权 BA 无标度网络, 参数 $n = 1\ 000, m = 5$, 其度分布满足幂律, 即 $p(k) \sim k^{-\lambda}, \lambda = 3$. 在不同的 α 参数值下, 序参数 η 随数据包产生率 R 的变化, 如图 1 所示. 由图 1 可知: 当 α 取不同值, 数据包产生率 R 小于一个特定的临界值 R_c 时, $\eta = 0$; 而当 R 超过 R_c 时, η 的值开始变大. 从图 1 中还能发现: α 取值不同时, R_c 也是不一样的.

在不同路由策略值 α 对应网络拥塞相变点 R_c 的仿真实验, 如图 2 所示. 从图 2 可知: 当 $\alpha = -1.0$ 时, R_c 取得最大值. 参数 α 不同, 网络中的数据包数目 $N_p(t)$ 也相差较大, 结果如图 3 所示. 从图 3 可知: 当 $\alpha = -1.0$ 时, 在相对短的时间内, 整个网络会进入一个平衡的状态, 并且网络性能达到最优. 对比随机游走路由策略(当 $\alpha = 0$ 时)时的 $R_c = 11$, 文中提出的路由策略在 $\alpha = -1.0$ 时 $R_c = 50$, 更大的 R_c 值意味着采用文中提出的路由策略可以获得更大的网络容量.

实验仿真证明文中提出路由策略的有效性, 即当 $\alpha = -1.0$ 时, 网络中的负载在各个节点分布均匀, 而不会拥挤在度大的节点, 从而有效抑制了网络拥塞.

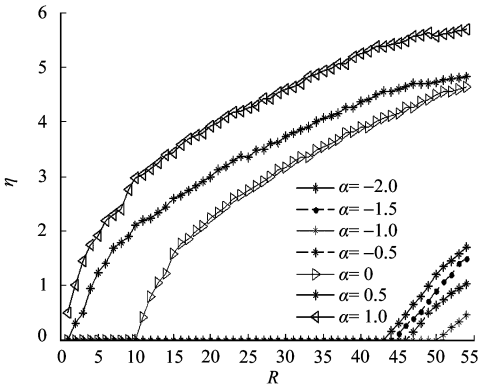


图 1 序参数 η 随数据包产生率 R 的变化
Fig. 1 Order parameter η changes with the packet generation rate R

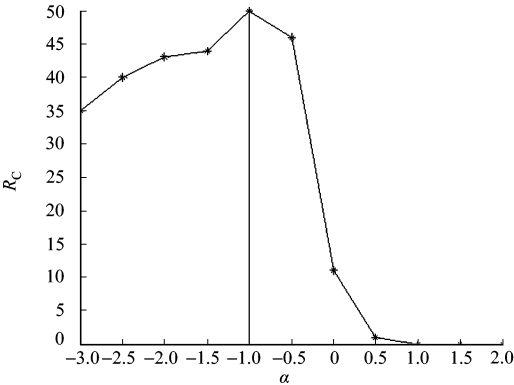


图 2 路由策略值与网络拥塞相变点的对应关系
Fig. 2 Relationship between value of routing strategy and phase transition point of network congestion

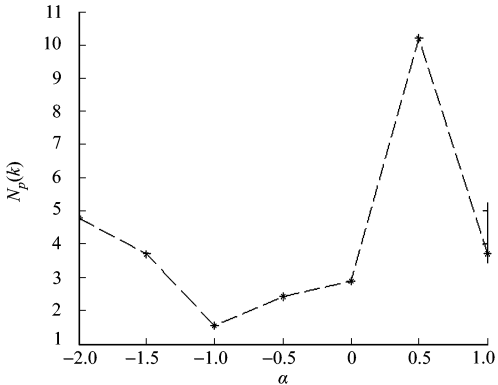


图 3 路由策略值与数据包数目的对应关系
Fig. 3 Relationship between value of routing strategy and number of packets

为探究网络在 $\alpha = -1.0$ 时出现最优值的原因, 分析了节点平均负载与度的相关性. 设 $l_i(t)$ 为节点 i 在 t 时刻的数据队列长度, k_i 为节点 i 的度, 在非拥塞状态下, $l_i(t)$ 的演化为

$$\begin{aligned} \frac{dl_i(t)}{dt} = & -l_i(t) + \sum_{j=1}^k \mathbf{A}_{i,j} l_j(t) \Pi_i = \\ & -l_i(t) + \sum_{j=1}^N \mathbf{A}_{i,j} l_j(t) \frac{[(l_i(t) + 1)k_i]^\alpha}{\sum_{l=1}^N \mathbf{A}_{j,l} [(l_l(t) + 1)k_l]^\alpha}. \end{aligned} \tag{3}$$

式(3)中: $\mathbf{A}_{i,j}$ 是连接矩阵的元素;求和号是对处于网络中的所有结点进行的. 若在结点 i 与结点 j 之间有一条边,则 $\mathbf{A}_{i,j}=1$,否则 $\mathbf{A}_{i,j}=0$.

式(3)右边第一项表示结点 i 向其邻域递送出所有的信息包 $l_i(t)$. 这是因为在畅通自由交通流态,在所有结点处都不发生信息传输的交通拥挤,每一个结点都能够把到达该结点而需要传送出去的所有信息包都递送出去. 所以,右边第一项是 $l_i(t)$. 式(3)右边第二项表示结点 i 在时刻 t 从其所有邻域收到的信息包. 考虑到 BA 网络之同类配合性为零,亦即平均来说,每一个结点与其邻域结点的连接度是相等的,所以可以推导出

$$\sum_{l=1}^N \mathbf{A}_{j,l} [(l_l(t) + 1)k_l]^\alpha = \sum_{l=1}^N \mathbf{A}_{j,l} \tau w = K_j \tau w. \tag{4}$$

式(4)中: τw 为常数.

由于在畅通自由交通流状态,网络中所产生的信息包数目与所撤除的信息包数目可以相互抵消,或者说在每一结点处所收到的信息包数目与所递送出去的信息包数目是相互平衡的,因而有 $dl_i/dt=0$. 对方程(4)进行简化,可得

$$l_i(t) = \sum_{j=1}^N \mathbf{A}_{i,j} l_j \frac{[(l_i + 1)k_i]^\alpha}{k_j W} \approx \sum_{j=1}^N \mathbf{A}_{i,j} l_j \frac{[(l_i k_i)^\alpha]}{k_j W}, \tag{5}$$

由于直接求解这个方程比较困难,因此假定 $l_i(t)=Ck_i^\theta$. 其中: C 为一个常数. 将其代入方程(5)可得

$$Ck_i^\theta = \frac{Ck_i^{(1+\theta)\alpha}}{W} \mathbf{A}_{i,j} k_j^{\theta-1} = \frac{Ck_i^{(1+\theta)\alpha}}{W} k_i W = k_i^{(1+\theta)\alpha+1}. \tag{6}$$

由此可知,在网络处于自由态时,网络中的各节点的信息包数量与节点度满足幂率 $l(t) \propto k^\theta$. 其中,标度指数 $\theta = \frac{\alpha+1}{\alpha-1}$.

为了进一步理解为何 $\alpha=-1.0$ 时网络最优,进一步研究了节点的平均数据包数目与节点度 k 之间的对应关系. 平均数据包数目是对具有相同度的节点上的数据包数目求和然后取平均. 节点的递送能力与其度是一个正比关系,因此整个网络中的数据包分布就不一样. 在拥塞状态下,度值为 k 的节点在不同参数 α 下的平均数据包个数 $N_p(k)$ 分布,如图 4 所示.

从图 4 可知:当 $\alpha \leq 0$ 时,网络中存在部分度值小的节点缓冲队列里有较高的数据包量,恰恰由于这些节点中的大量数据包没有得到及时处理,从而导致网络拥塞;而当 $\alpha=-1.0$ 时,即使网络处于拥塞,网络中度大节点的缓冲队列具有较多的数据包,而这些节点的处理能力也更强,因此对于抑制网络拥塞具有更好的效果.

3 结束语

探讨加权无标度网络上信息包的路由问题,给出一种新的基于网络局部信息的路由策略. 在对比已有的优化路由策略基础上,仿真并分析了这种路由策略的有效性. 新的路由策略通过节点自身邻居节点的度信息和节点队列的实时长度来进行路由选择,可以正确地根据网络实时动态进行路由.

参考文献:

[1] BOCCALETTI S, LATORA V, MORENO Y. Complex networks: Structure and dynamics[J]. Phys Rep, 2006, 424

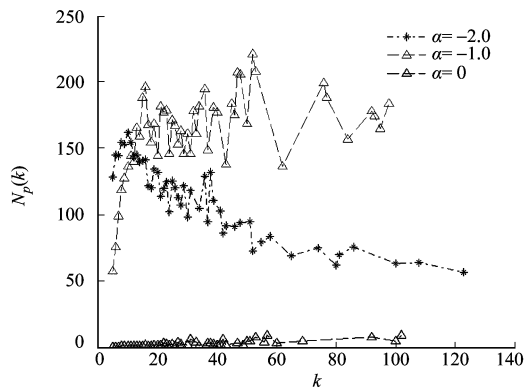


图 4 度值为 k 的节点的平均数据包个数分布
Fig. 4 Average number of packet distribution value of k nodes

(4/5):175-308.

- [2] YANG Han-xin, WANG Wen-xu, WU Zhi-xi, et al. Traffic dynamics in scale-free networks with limited packet-delivering capacity[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2008, 387(27): 6857-6862.
- [3] CAO Xian-bin, DU Wen-bo, CHEN Cai-long, et al. Effect of adaptive delivery capacity on networked traffic dynamics[J]. Chin Phys Lett, 2011, 28(5): 058902(1-4).
- [4] DU Wen-bo, CAO Xian-bin, CHEN Cai-long, et al. The effect of packet lifetime on scale-free network information traffic[J]. Physical A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2011, 390(21/22): 3982-3988.
- [5] BARABÁSL A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286: 509-512.
- [6] NEWMAN M E J. Scientific collaboration networks (II): Shortest paths, weighted networks, and centrality[J]. Phys Rev E June, 2001, 64(1): 016132(1-7).
- [7] LIU Zong-hua, MA Wei-chuan, ZHANG Huan, et al. An efficient approach of controlling traffic congestion in scale-free networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2006, 370(2): 843-853.
- [8] DANILA B, YU Y, MARSH J A, et al. Optimal transport on complex networks[J]. Bassler Phys Rev E, 2006, 74(4): 046106(1-4).
- [9] LIU Zhe, HU Mao-bin, JIANG Rui, et al. Method to enhance traffic capacity for scale-free networks[J]. Phys Rev E, 2007, 76(3): 037101(1-4).
- [10] VALVERDEL S, SOLE R V. Internet's critical path horizon[J]. European Physics Journal B, 2004, 38(2): 245-252.
- [11] YAN Gang, ZHOU Tao, HU Bo. Efficient routing on complex networks[J]. Phys Rev E, 2006, 73(4): 046108(1-5).
- [12] SOLE R V, VALVERDE S. Information transfer and phase transitions in a model of internet traffic[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2001, 289(3/4): 595-605.
- [13] MUKHERJEE G, MANNA S S. Phase transition in a directed traffic flow network[J]. Phys Rev E, 2005, 71(6): 066108(1-6).
- [14] WANG Wen-xu, WANG Bing-hong, HU Bo, et al. General dynamics of topology and traffic on weighted technological networks[J]. Phys Rev Lett, 2005, 94(18): 188702(1-4).
- [15] WANG Wen-xu, WANG Bing-hong, YIN Chuan-yang, et al. Traffic dynamics based on local routing protocol on a scale-free network[J]. Phys Rev E, 2006, 73(2): 026111(1-7).

Improved Routing Strategy Based on Local Network Information on Weighted Scale-Free Network

LIU Zhang-hui, TANG Zhen-li, GUO Wen-zhong

(College of Mathematics and Computer Science, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: For existing deficiencies of the present routing strategies, a new routing strategy based on local network information is presented. Using static information of network nodes in local neighbors of the network and adding nodes' queue dynamic information to the routing stage, nodes can correctly route packets according to the static network information and real-time dynamic information. We prove the routing strategic effectiveness through the experimental simulation results. When the control parameter α equals to -1.0 , the network's load is evenly distributed in each node, and won't be crowded in the nodes with large degree, thereby effectively inhibit the network congestion.

Keywords: scale-free; communication network; routing strategy; congestion; network capacity; node strength

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 吴逢铁)