

复杂网络的一种加权路由策略研究^{*}

陈华良[†] 刘忠信 陈增强 袁著祉

(南开大学自动化系, 天津 300071)

(2008 年 3 月 3 日收到, 2009 年 2 月 10 日收到修改稿)

复杂网络的传输能力是其功能正常运转的重要保障, 提高网络的吞吐量有着重要意义. 提出一种新的高效路由策略, 以提高复杂网络的传输能力, 称之为加权路由策略. 即对网络的每一条边加权, 权值与该边的两端节点的度相关, 然后数据包按照这个加权网络的最短路径路由. 这样的路径可以更均匀地经过各个节点, 发挥它们的传输能力, 极大地提高网络的吞吐量. 可以避免数据包集中地通过个别度大的节点, 在这些节点发生拥塞. 仿真显示, 该策略比传统的最短路径策略优越, 对很多结构的网络, 可以提高几十倍的吞吐量.

关键词: 复杂网络, 路由策略, 吞吐量, 拥塞

PACC: 0590, 0560

1. 引 言

自从 Watts 和 Strogatz 发现小世界特性^[1], Barabási 和 Albert 提出无标度复杂网络模型^[2]开始, 复杂网络的研究成为了物理、控制、计算机等领域新的热点^[3-8]. Internet 网络、电力网、航空运输网等都可以抽象为复杂网络进行研究^[9-11], 而这些网络的传输能力和我们的生活密切相关. 因此研究人员越来越关注复杂网络吞吐量的研究^[12-30]. 影响网络传输能力的因素主要有两种类型, 一个是网络结构性因素, 如网络的连接方式、节点的处理能力^[28]、连接的带宽等; 另一个是路由策略因素, 一个好的路由方案可以极大地提供网络的吞吐量. 要改变网络结构, 通常比较困难, 如对 Internet 网络的某两个路由器增加一个连接, 就需要在它们之间铺设一条通信线路, 费用可能非常昂贵, 不现实, 而采用好的路由方案提高网络的传输能力比较可行. 所以在研究网络的吞吐量方面, 目前通常是针对路由策略进行研究.

在过去, 有很多关于随机和规则网络路由策略的研究, 并得出一些有价值的结论. 最近, 复杂网络的路由策略开始受到关注, 研究人员提出了一些不错的路由方案. 这些策略大体可以分成三类: 1) 全局

型的路由策略, 需要获知整个网络的拓扑信息; 2) 局部型的路由策略, 只需知道临近节点的信息; 3) 混合型路由策略, 全局和局部的信息都需要利用.

传统的最短路径路由就是典型的全局型路由方案, 即起始节点为 A, 终止节点为 B 的数据包沿着 A 到 B 的最短路径传输, 这里最短路径指的是其经过的节点(或边数)最少. 这种策略的优点是数据包可以最快地到达目的地, 但是容易发生拥塞. 特别是在复杂网络中, 数据包会很快拥堵在度大的节点上^[12, 13]. 文献 [14] 提出了一种改进的最短路径, 称为有效路径(effect path), 这个策略在计算最短路径时, 将节点度考虑进来, 从而可以避免最短路径过多地通过几个度大的节点, 减少了在这些节点拥塞的可能性. 经过仿真实验, 网络的吞吐比传统最短路径大了很多. 这是一个简单而高效的路由策略, 我们也从中受到了很多启发.

相对全局型策略, 局部型策略只需知道局部信息就可以^[15, 18, 19, 29], 更容易实现, 但是性能上相对差一些. 文献 [15] 提出一种策略, 对任一节点 A, 如果数据包的目的地是节点 A 的直接邻居, 则直接送达. 如果不是, 则发送给邻居 i 的概率为 $k_i / \sum k_j$, 其中 k_i 为节点 i 的度, j 表示 A 的任一邻居.

混合型策略是将一个节点到达其他节点的最短

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60774088, 60574036), 教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-2005-229), 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20050055013), 教育部科学技术研究重点项目(批准号: 107024)资助的课题.

[†] E-mail: chenhl03@yahoo.com

路径长度及其邻居的度或缓存等因素综合考虑^[16,17,23].在文献[16]中,作者提出一种叫“traffic awareness”的路由策略,这个策略根据邻居节点到目的地的长度及其当前拥塞情况来选择路径.设节点 A 有一个发往 B 的数据包 P,首先计算 A 节点的邻近节点 i 的 H_i 值, H_i 定义如下:

$$H_i = \alpha \frac{d_i}{\sum_{j \in g(i)} d_j} + (1 - \alpha) \frac{l_i}{\sum_{j \in g(i)} l_j} \quad 0 \leq \alpha \leq 1, \quad (1)$$

其中 $g(i)$ 为 A 所有邻居集合, d_i 为 i 到 B 的最短路径长, $l_i = c_i/k_i$ 表示为数据包在节点 i 的等待时间, c_i 为 A 的队列长度, k_i 为 A 每次能发送的数据包数.然后选择 A 的邻居里 H 最小的节点,将数据包 P 发给它.

在文献[23]中,作者提出一种随机路由策略,设节点 A 有一个发往 B 的数据包 P, i, j 为 A 的邻居, d_i, c_i 与上面定义相同.根据

$$H_i = \alpha d_i + (1 - \alpha) c_i \quad 0 \leq \alpha \leq 1, \quad (2)$$

$$\Pi_i = \frac{e^{-\beta H_i}}{\sum_j e^{-\beta H_j}}, \quad (3)$$

计算 A 的每一个邻居 i 的 Π_i ,作为发送给 i 的概率.

另外,文献[20]提出一种提高网络吞吐量的策略,即将边按 $k_i \times k_j$ 排序(k_i, k_j 为两端节点的度)然后把排在前面的边删除,减少网络在个别度大的节点拥塞的可能性,从而提高了网络的传输能力.

本文提出一种新的全局型路由策略,将网络中的边附上权重,然后计算加权后的最短路径,这样的路径可以更均匀地通过各个节点,发挥它们的传输能力,极大地提高网络吞吐量.

2. 加权路由策略

2.1. 网络流量模型

在研究网络吞吐量前,先需要确定网络的流量模型.本文采用如下常见的模型:对于给定的一个复杂网络,假设每个节点都具有相同的功能,即路由、发包、收包的功能,随机选择 R 个起始节点和 R 个终止节点,每个起始节点产生固定数量的数据包,一般设为 1 个,所有节点有相同的传输能力,每一步传输 C 个包,一般设 $C = 1$,每个节点的缓存队列为无

限长,队列为先入先出的方式.数据包根据一定的路由策略被传输到下一个节点,如果该节点就是这个数据包的终止节点,则删除该数据包,如果不是,则进入该节点的缓存队列,等待下次传输.

不同的路由策略下,网络有不同的吞吐量,以每一步的发包量 R 来衡量.我们关心的是一个网络的发包量的关键值 R_c ,当 $R < R_c$ 时,产生的数据包和发送的数据包基本相同,处于持平状态,网络处于稳定的空闲状态;当 $R > R_c$ 时,开始出现拥塞,产生的数据包不能完全及时被送达.一般使用有序参数 (order parameter) 来刻画网络的这种状态转换^[26]:

$$\chi(R) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C}{R} \frac{\Delta W}{\Delta t}, \quad (4)$$

其中 $\Delta W = W(t + \Delta t) - W(t)$, $W(t)$ 表示 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.当 $R < R_c$, $\chi(R)$ 小于等于 0,当 $R > R_c$, $\chi(R)$ 大于 0,所以使 $\chi(R) = 0$ 的最大的 R 就是网络的吞吐量 R_c .

2.2. 加权路由策略

为了提高网络的吞吐量,我们在设定的流量模型中提出下面的路由策略:对于节点 i, j , k_i, k_j 分别表示它们的度, $w_{ij}^{(\alpha, \beta)} = k_i^\alpha \times k_j^\beta$ 作为节点 i 到 j 的边 e_{ij} 的权重(如果 i, j 之间存在直接连接),其中 α, β 为可调整参数,这样,整个网络就变成了加权网络.假设节点 a 到 b 的任一条路径 $P_f(a, b)$ 为 $a = x_0, x_1, \dots, x_n = b$,则该路径长度为

$$L(P_f(a, b))^{(\alpha, \beta)} = \sum_{i=0}^{n-1} w_{(i+1)}^{(\alpha, \beta)} \sum_{i=0}^{n-1} (k_i^\alpha \times k_{i+1}^\beta). \quad (5)$$

使 $L(P_f(a, b))^{(\alpha, \beta)}$ 最短的路径,我们称为 a 到 b 的最短加权路径, $a \rightarrow b$ 的数据包将沿着这条路径传输.这个路由策略我们称之为加权路由策略.当 $\alpha = 0, \beta = 0$ 时,最短加权路径即为传统意义上的最短路径;当 $\alpha = 1, \beta = 0$ 时,最短加权路径策略即为文献[14]所提出的路由策略.它们都是加权路由策略的特例.

同时,我们可以发现,对于无向复杂网络,则 (α, β) 加权策略下, $a \rightarrow b$ 的最短路径 $P_f(a, b)$ 即是 (β, α) 加权策略下 $b \rightarrow a$ 的最短路径.因为对于无向网络, $a \rightarrow b$ 的每一条路径也是 $b \rightarrow a$ 的路径.对于上面设定的 $a \rightarrow b$ 的路径 P_f ,对应如下 $b \rightarrow a$ 的路径:

$$P_f(b, a) : b = x_n, x_{n-1}, \dots, x_0 = a, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} L(P_f(b, a))^{\beta, \alpha} &= \sum_{i=0}^{n-1} w_{\chi(i+1)}^{(\beta, \alpha)} \\ &= \sum_{i=0}^{n-1} (k_{i+1}^\beta \times k_i^\alpha), \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L(P_f(b, a))^{\beta, \alpha} &= \sum_{i=0}^{n-1} (k_i^\alpha \times k_{i+1}^\beta) \\ &= L(P_f(a, b))^{\alpha, \beta}, \quad (8) \end{aligned}$$

即 (α, β) 加权策略下, $a \rightarrow b$ 任一路径 $P_f(a, b)$ 度等于 (β, α) 加权策略下, 对应的 $b \rightarrow a$ 的路径 $P_f(b, a)$ 的长度, 所以使 $L(P_f(a, b))^{\alpha, \beta}$ 最小的路径 $P_f(a, b)$, 必然其 $L(P_f(b, a))^{\beta, \alpha}$ 也是最小, 即 (α, β) 下 $a \rightarrow b$ 的最短路径就是 (β, α) 下 $b \rightarrow a$ 的最短路径.

如果产生和接受数据包的概率相同, 发送的数据包足够多, 则 a 到 b 的数据包和 b 到 a 的数据包一样多, 即 (α, β) 下经过 $a \rightarrow b$ 的最短路径 $P_f(a, b)$ 的数据包和 (β, α) 下经过 $b \rightarrow a$ 的最短路径 $P_f(b, a)$ 的数据包数相同, 由上面可知, $P_f(a, b)$ 和 $P_f(b, a)$ 是同一条路径, 所以在这两个策略下, 经过任意两点的最短路径的流量相同, 所以网络的吞吐量相同(见第 3.1 节仿真).

本文主要关心的是不同的 α, β 对网络传输能力的影响, 并试图找到合理的 α, β , 使网络传输能力比以前的传统最短路径策略和文献 [14] 给出路由策略更大. 下面简单分析加权路由策略和网络传输能力的关系.

首先, 介绍网络的节点介中心 (betweenness centrality, BC) 属性^[41], 节点 μ 的介中心定义如下:

$$g_\mu = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V, j \neq i} \frac{C_\mu(i, j)}{\alpha(i, j)}, \quad (9)$$

其中 $\alpha(i, j)$ 表示从 i 到 j 的所有最短路径数, $C_\mu(i, j)$ 表示从 i 到 j 的最短路径中经过 μ 的条数. 这里的“最短路径”不单单指传统意义上的最短路径, 也可以是加权最短路径, 所以节点的介中心值根据路由策略的不同而不同.

根据文献 [12, 13], 在最短路径的路由策略下, 网络中每个节点每一步收到的数据包为 $Rg_\mu / (N - 1)$, 而本文中每个节点每一步的传输能力为 1 个数据包, 而每个节点收到的数据包要小于等于发送的数据包, 网络才不会拥塞, 所以有下面关系式:

$$Rg_\mu / (N - 1) \leq 1, \quad (10)$$

$$R \leq (N - 1)g_\mu. \quad (11)$$

对于任意的节点 μ 都要成立, 所以 $R \leq (N - 1)g_{\max}$.

当 $R = (N - 1)g_{\max}$ 时, 网络达到最大传输能力. 其中 g_{\max} 为网络最大的介中心值. 所以网络的传输能力一般由介中心最大的节点决定, 这个节点最容易先拥塞, 并迅速蔓延到整个网络^[21].

在传统的最短路径下, 节点度和介中心通常成正比关系, 最大的介中心非常大, 所以网络的传输能力比较差. 要改善网络的吞吐量, 只要减小最大介中心的值即可. 在本文中提出的加权最短路径策略中, 将节点的度作为连接边的权重考虑在路径里, 就使得节点的介中心值比较均匀, 从而提高了网络的传输能力. 避免大量的路径都经过个别度大的节点, 避免数据包拥堵在这几个节点上(见第 3 节仿真).

3. 仿 真

3.1. 加权路由策略的表现

我们采用 BA 模型, 对 $N = 100, 500, 1000, 2000$ 等, $m = 2, 5$ 等都做过仿真.

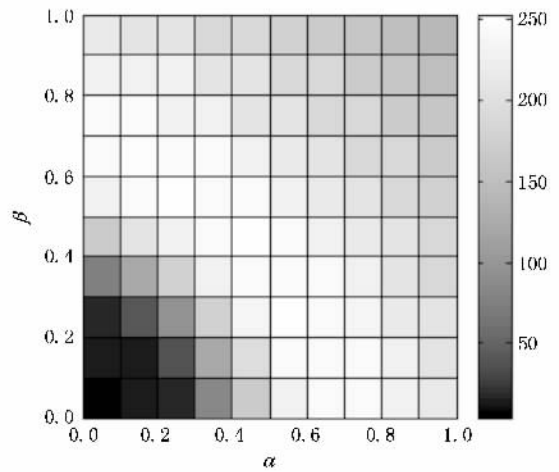


图 1 不同 α, β 下网络的 R_c 值分布

把 α, β 分别由 0 变动到 1, 每次增加 0.1, 测量在不同 α, β 下网络的 R_c 值. 图 1 为 $N = 1000, m = 5$ 的 BA 网络 R_c 的分布图, 由图可知, $\alpha + \beta = 0.8$ 直线附近, 网络达到最大吞吐量. 具体的 $(0.3, 0.5)$ 表示 $\alpha = 0.3, \beta = 0.5$, 下同, $(0.5, 0.3), (0.6, 0.2)$ 等点达到最大 $R_c = 148$; 而在传统的最短路径路由策略下, 即 $\alpha = 0, \beta = 0$ 时, R_c 仅为 4, 远小于我们的策略, 而 $\alpha = 1, \beta = 0$ 时, 即文献 [14] 所提出的路由策

略, $R_c = 123$, 也远比传统的要优越, 但还是略差于我们的策略. 同时, 容易看出, 图片关于 $\alpha = \beta$ 对称, 这和我们上一节的分析符合. 其他结构的网络仿真都有上面类似的特点, 在 $\alpha + \beta = 0.8$ 直线附近 R_c 最大, 虽然达到最大值的点根据节点数和 m 值不同略有不同, 如有的点是 $(0.3, 0.5)$, 有的是 $(0.6, 0.2)$, 但是在这个区域附近的 R_c 相差不大 (1% 左右). 所以一般地, 我们可以选择 $(0.3, 0.5)$ 为网络的加权路由策略.

图 2 显示了 $N = 100, 200, 500, 800, 1000, 2000, m = 5$ 时在 α, β 取 $(0, 0), (0.3, 0.5), (1, 0)$ 时, 网络的吞吐量, 可以看到 $(0.3, 0.5)$ 的策略要优于其他两种, 特别是传统的最短路径 $(0, 0)$, 其吞吐量随着节点的增多, 没有发生太大的变化, 都比较小.

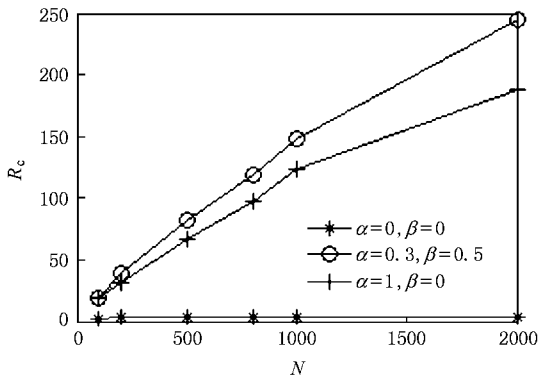


图 2 不同的 α, β 下, 网络节点数和 R_c 值的关系

采用加权路由策略后, 避免了网络在个别度大的节点拥堵的情况, 网络的吞吐量显著增加, 但是路径的长度会发生什么变化呢? 图 3 显示了在不同的 α, β 下, 路径平均长度 (所有最短路径的平均值) 和网络的节点数的关系, 由图可知, 虽然加权路径 (α, β 不全为零) 的长度要大于传统的最短路径的平均长度, 但是只增加了一点, 且仍遵守小世界特性, $L_{avg} \sim \ln N$.

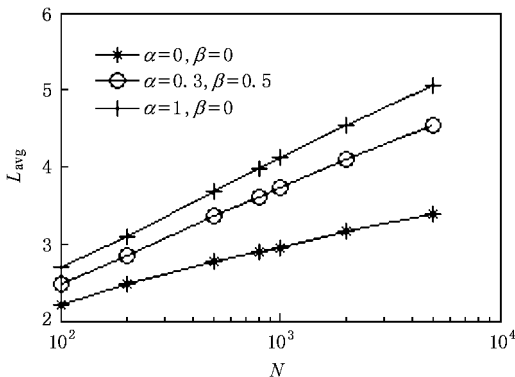


图 3 不同的 α, β 下, 网络节点数和平均路径长的关系

3.2. BC 和网络吞吐量的关系

因为在我们的策略里, 将节点的度为连接边的

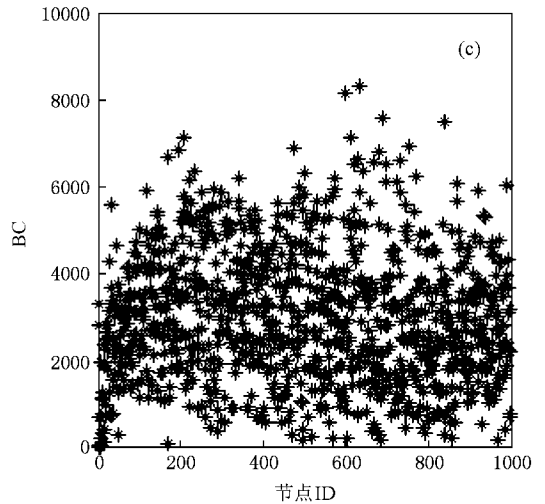
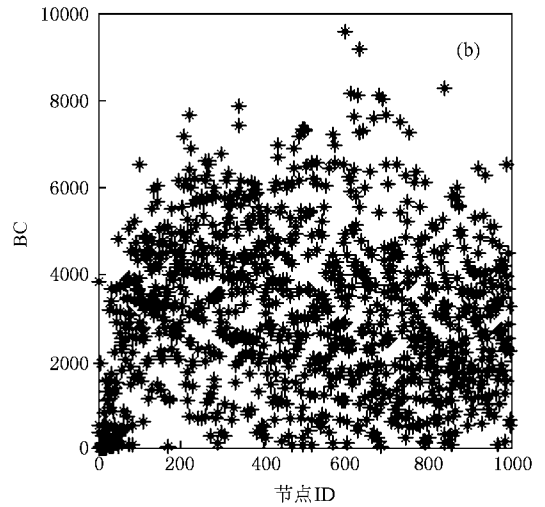
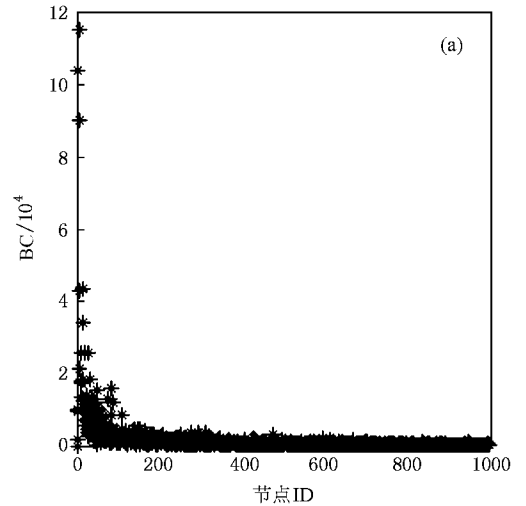


图 4 不同的 α, β 下, 网络节点 BC 值分布 (a)(b)(c) 分别对应 $(0, 0), (1, 0), (0.3, 0.5)$

权重考虑在路径里,这样就可以避免大量的路径都经过个别度大的节点,避免数据包拥堵在这几个节点上.

接下来,我们以 $N = 1000, m = 5$ 的 BA 网络为例,深入研究加权路由策略表现优秀的原因.根据第 2 节的分析,网络的传输能力受制于网络中最大的 BC 值,如图 4 分别显示了网络在 $(0, 0), (1, 0), (0.3, 0.5)$ 对所有节点的 BC,在传统的最短路径下,网络中的 BC 值分布极不均匀,存在个别 BC 值非常大的节点,最大 BC 为 115143,在将节点度考虑到路径中后,BC 变得均匀了很多,在 $\alpha = 1, \beta = 0$ 时,最大 BC 值为 9599,已经表现很好了,而在 $\alpha = 0.3, \beta = 0.5$ 时,最大 BC 值为 7059,所以这种情况是最好的,即网络的吞吐量最大,与上面的实验数据一致.图 5 显示了 BC 值和网络拥塞的关系,图中显示的是由 $R = 300$,运行 10000 步后得到各个节点缓存的数据包数,由于 $R_c = 148 < R$,所以网络处于拥塞状态,可以看出一个节点的 BC 值与其缓存的数据包

数基本成正比.图 6 显示了仿真获得的 $\alpha, \beta = 0, 0.1, 0.2, \dots, 1$ 时网络吞吐量,同时还绘制了通过 BC 计算(见第 2 节)得到的吞吐量,容易看出,它们基本符合.

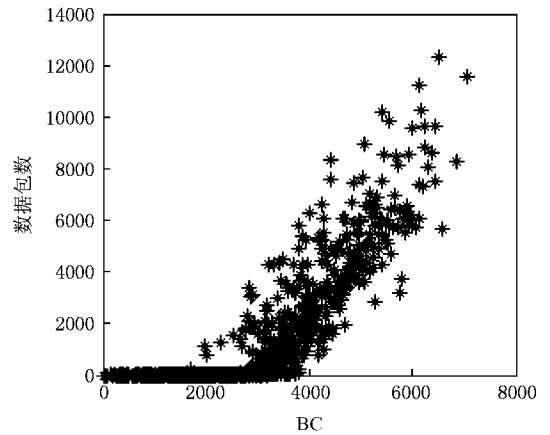


图 5 在 $(0.3, 0.5)$ 时节点 BC 值与其拥塞程度(缓存的数据包数)的关系

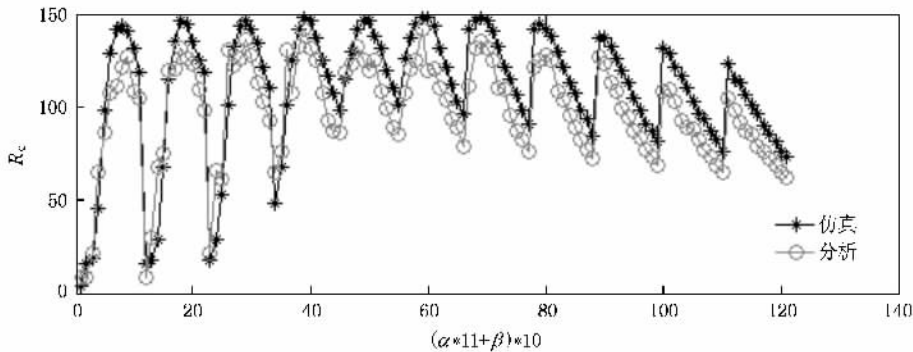


图 6 仿真获得的 R_c 值与分析获得 R_c 值的关系

4. 结 论

本文提出了一种加权路由策略,极大地提高了网络的吞吐量.即将 $w_{ij} = k_i^\alpha \times k_j^\beta$ 作为节点 i 到 j 的边 e_{ij} 的权重(如果 i, j 之间存在直接连接),其中 α, β 为可调整参数, k_i, k_j 分别表示节点 i, j 的度,这样就得到了一个加权网络,然后计算这个网络的最短路径作为路由的路径.通过仿真,我们发现,在 $\alpha + \beta = 0.8$ 直线附近 R_c 最大,一般地,可以选择 $\alpha = 0.3, \beta = 0.5$,在这个策略下,可以为很多网络相比传统最短路径提高几十倍的吞吐量,且也优于文献 [14] 的路由策略.实际上,这个策略使网络的节点介

中心分布比较均匀,而传统的最短路径下,介中心分布非常不均匀,存在个别特别大的介中心值.而网络的吞吐量通常受制于网络中最大的介中心值,所以我们的策略可以提高网络的传输能力.

要实现我们的策略,每个节点需要知道整个网络的拓扑,对于特大型的网络来说,有一定的难度.但是,也可以通过变通的方式来实现,如对大型的网络进行划分,分割成一个个小的子网,在子网内实现我们的策略,然后将子网看成节点再组成一个网络,实行层次结构.实现上,Internet 网络就是超大规模的复杂网络,实现了一个层次结构路由,因此,我们的加权路由策略也可以在上面实现.

- [1] Watts D J , Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 440
- [2] Barabasi A L , Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [3] Boccaletti S , Latora V , Moreno Y , Chavez M *et al* 2006 *Physics Reports* **424** 175
- [4] Newman M E J 2003 *Siam Review* **45** 167
- [5] Li J , Wang P H , Jiang P Q , Zhou T *et al* . 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4051 [in Chinese] 李季、汪秉宏、蒋品群、周涛等 2006 物理学报 **55** 4051]
- [6] Xu D , Li X , Wang X F 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1313 [in Chinese] 许丹、李翔、汪小帆 2007 物理学报 **56** 1313]
- [7] Fang X L , Jiang Z L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7330 [in Chinese] 方小玲、姜宗来 2007 物理学报 **56** 7330]
- [8] Wu Y , Xiao J H , Wu Z Y , Yang J Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2037 [in Chinese] 吴晔、肖井华、吴智远、杨俊忠 2007 物理学报 **56** 2037]
- [9] Ravasz E , Barabasi A L 2003 *Phys. Rev. E* **67** 026112
- [10] Bai W J , Wang B H , Zhou T 2005 *Complex Systems and Complexity Science* **3** 29 [in Chinese] 柏文洁、汪秉宏、周涛 2005 复杂系统与复杂性科学 **3** 29]
- [11] Liu H K , Zhou T 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 106 [in Chinese] 刘宏鲲、周涛 2007 物理学报 **56** 106]
- [12] Goh K I , Kahng B , Kim D 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 278701
- [13] Zhao L , Lai Y C , Park K , Ye N 2005 *Phys. Rev. E* **71** 026125
- [14] Yan G , Zhou T , Hu B , Fu Z Q *et al* 2006 *Phys. Rev. E* **73** 046108
- [15] Wang W X , Wang B H , Yin C Y , Xie Y B *et al* 2006 *Phys. Rev. E* **73** 026111
- [16] Chen Z Y , Wang X F 2006 *Phys. Rev. E* **73** 036107
- [17] Echenique P , Gomez-Gardenes J , Moreno Y 2005 *Europhys. Lett.* **71** 325
- [18] Hu M B , Wang W X , Jiang R , Wu Q S *et al* 2007 *Phys. Rev. E* **75** 036102
- [19] Wang W X , Yin C Y , Yan G , Wang B H 2006 *Phys. Rev. E* **74** 016101
- [20] Liu Z , Hu M B , Jiang R , Wang W X *et al* 2007 *Phys. Rev. E* **76** 037101
- [21] Guimera R , Diaz-Guilera A , Vega-Redondo F , Cabrales A *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 248701
- [22] Toroczkai Z , Bassler K E 2004 *Nature* **428** 716
- [23] Echenique P , Gomez-Gardenes J , Moreno Y 2004 *Phys. Rev. E* **70** 056105
- [24] de Moura A P 2005 *Phys. Rev. E* **71** 066114
- [25] Holme P 2003 *Advances in Complex Systems* **6** 163
- [26] Arenas A , Diaz-Guilera A , Guimera R 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3196
- [27] Ashton D J , Jarrett T C , Johnson N F 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94**
- [28] Liu Z H , Ma W C , Zhang H , Sun Y , Hui P M 2006 *Phys. A* **370** 843
- [29] Zhang H , Liu Z H , Tang M , Hui P M 2006 *Phys. Lett.* **364** 177
- [30] Zhu X Y , Liu Z H , Tang M 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 2142

Research on one weighted routing strategy for complex networks *

Chen Hua-Liang[†] Liu Zhong-Xin Chen Zeng-Qiang Yuan Zhu-Zhi

(Department of Automation , Nankai University , Tianjin 300071 , China)

(Received 3 March 2008 ; revised manuscript received 10 February 2009)

Abstract

The efficient functioning of complex networks rely on their traffic capacity , so it is significant to improve their throughput . We propose a new efficient routing strategy called weighted routing strategy to enhance the traffic capacity . Each edge is assigned a value that is related with its end degree . Then packets are transported across the shortest paths of the weighted network . This kind of paths can more evenly go through the vertices and utilize their transport ability . They avoid collectively passing certain vertices which makes them congested , thus the throughput of the network is improved . It is demonstrated by simulations that our strategy is more powerful than the traditional shortest-path strategy , and improves tens of times the throughput for many structures of networks .

Keywords : complex networks , routing strategy , throughput , congestion

PACC : 0590 , 0560

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60774088 and 60574036) , the Program for New Century Excellent Talents in University of China (Grant No. NCET-2005-229) , the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20050055013) , and the Science & Technology Research Key Project of Education Ministry of China (Grant No. 107024) .

[†] E-mail : chenhl03@yahoo.com