

一种复杂网络路由策略的普适优化算法*

李世宝 娄琳琳[†] 陈瑞祥 洪利

(中国石油大学(华东) 计算机与通信工程学院, 青岛 266580)

(2013年9月14日收到; 2013年10月4日收到修改稿)

现有的复杂网络路由策略很多, 改进算法也不断涌现, 但是目前还没有一个统一的标准来衡量算法是否达到网络最佳传输效果. 针对这一问题, 本文提出一种适用于现有路由策略的普适优化算法. 首先通过理论分析指出制约网络传输能力的关键因素是最大介数中心度, 因而“最大介数中心度是否已经最低”成为评判路由策略是否最优的标准. 在此基础上, 采用“惩罚选择法”避开网络中介数中心度值比较大的节点, 使网络介数中心度值分布更均匀, 均衡网络中各个节点的传输负载. 仿真结果显示, 该优化算法针对现有路由策略均能降低最大介数中心度值, 大幅度提高网络的传输能力.

关键词: 复杂网络, 路由策略, 拥塞, 标准

PACS: 89.75.Hc, 89.75.Fb

DOI: 10.7498/aps.63.028901

1 引言

近年来, 复杂网络受到了广泛关注, 与我们的生活密切相关的因特网、交通运输网、电力网等都可以抽象为复杂网络进行研究^[1-3]. 随着网络负载的不断增加, 现有网络的传输能力受到了极大的挑战, 如何提高现实网络的传输性能, 实现负载的高效传递成为一个重要的研究领域. 一般可以通过优化网络的拓扑结构^[4] 和设计最佳路由策略来提高网络传输能力. 由于更改已知网络的拓扑结构比较困难且开销较大, 因此更多的研究集中于寻找合适的路由策略方面^[5-25]. 基于复杂网络最佳路由问题的研究无疑具有极大的理论意义与实用价值.

最短路径路由策略(SR)是应用最为广泛的路由策略^[6], 可以找到两点间跳数最少的路径, 但由于无标度网络中节点度的异构性, 极易发生阻塞. 文献^[7]提出一种有效路由策略(ER), 通过寻找节点度和最小的路径, 避开网络中易阻塞的节点. 文献^[5, 8]提出基于节点度连乘积最小的优化路由策略, 提高了网络传输能力. 文献^[9]提出了一种基于社团结构的负载传输策略, 减少最短路由经过的社

团数量, 从而降低社团边缘节点的介数. 文献^[10]运用极值优化的算法计算路由表, 绕开介数中心度最大的节点. 文献^[11]基于归一化介数中心度的值, 将负载从大介数中心度节点转移到小介数中心度节点, 提高网络传输能力. 文献^[12, 13]提出基于引力约束的路由策略, 在保证传输效率的前提下提高了网络吞吐量. 文献^[14]改变了传统的先入先出的队列方式, 根据当前链路情况选择下一个转发数据包, 取得了很好的效果. 文献^[15]提出有效介数的概念, 实现了节点数据传输能力和链路带宽的最优分配, 网络传输能力得到明显改善. 文献^[16]根据信息素浓度选取最优路径, 提高网络吞吐量的同时降低了计算复杂度.

综上所述, 大多数的研究都将重点放在如何设计一种高效的路由策略来提高网络的传输性能. 新算法相对已有算法皆有不同程度的改进, 但是目前没有任何一种路由策略关注是否已经最大限度地提升了网络的传输性能, 也就是最优状态. 如何判断现有路由策略是否最优, 如果不是最优, 如何进一步地优化, 成为当前亟待解决的关键问题.

普适优化算法(AOR), 主要解决以下两个问题: 1) 评判现有的路由策略是否达到最佳, 是否还

* 中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: 12CX04077A)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: lishibao@upc.edu.cn

有进一步提升网络传输性能的空间; 2) 在评判现有路由策略的同时, 对其进行最大限度的优化.

2 路由策略的普适优化算法

2.1 网络流量模型

研究网络吞吐量之前, 首先给出网络负载传输的简化模型. 本文采用如下模型: 对于给定的一个复杂网络, 假设所有节点都兼有终端和路由器的功能, 既能产生和接收信息包, 又能转发信息包, 每个时间步, 在网络上产生 R 个信息包. 假设各节点的传输能力 C_i 相同, 不失一般性, 令 $C_i = 1$. 每个节点的缓存队列为无限长, 每个信息包随机选择源节点和目标节点, 根据一定的路由策略传输到下一个节点, 如果该节点就是目标节点, 则从网络中删除该信息包, 否则, 进入该节点的缓存队列, 等待下次传输.

2.2 最优评判准则

网络中的拥塞表现为信息流的相变, 即自由流状态转变为拥塞状态. 随着单位时间内产生的信息包量 R 的增大, 网络将由自由流状态进入阻塞状态, 其间存在一个临界值 R_c . 当 $R < R_c$ 时, 产生的信息包和发送的信息包基本相同, 网络处于稳定状态; 当 $R > R_c$ 时, 产生的信息包不能完全及时送达, 开始出现拥塞, 随着运行时间的增加, 拥塞规模会不断增大. R_c 是能够保证网络处于无拥塞状态的单位时间内新增信息包的最大量, 因此可以衡量一个网络的整体传输能力.

由于最容易产生拥塞的节点大多位于多条路径的交汇处, 这些节点都具有相对较大的介数中心度 (betweenness centrality, BC)^[26]. 节点 k 的介数中心度 B_k 定义为

$$B_k = \sum_{i \in V} \sum_{j \neq i \in V} \frac{C_{ij}(k)}{C_{ij}}, \quad (1)$$

其中, C_{ij} 表示从 i 到 j 的所有最短路径的条数, $C_{ij}(k)$ 表示从 i 到 j 的最短路径中经过 k 的条数. 此处的“最短路径”不仅仅指跳数上的最短路径, 还包括加权或者经过其他优化处理后的最短路径. 因此节点的介数中心度根据路由策略的不同而有所变化.

由 (1) 式可知, 节点 k 的介数中心度值是在路径生成的过程中计算得到的. 当路由表生成后介数

中心度的计算公式等价于 (2) 式. 其中, $\sigma(i, k, j)$ 表示经过节点 k 的最短路径.

$$B_k = \sum_{i \in V} \sum_{j \neq i \in V} \sigma(i, k, j). \quad (2)$$

每个时间步内网络上产生 R 个信息包, 且每个节点收到数据包的概率 P_k 如 (3) 式所示, 故每个节点每个时间步收到的数据包个数为 RP_k . 网络中每个节点有确定的发送能力 C_k , 当每个时间步内到来的信息包数量超过 C_k 时, 则会发生拥塞, 因此在 N 个节点的网络中, 只有满足 (4) 式才不会发生拥塞. 对整个网络而言, 临界值 R_c 产生在最易拥塞的节点上, 即介数中心度最大的节点. 如 (5) 式所示, 如果所有节点的传输能力均为 1, 要使临界值 R_c 最大, 则转化为求网络中最大介数中心度 B_{\max} 最小.

$$P_k = B_k / N(N-1), \quad (3)$$

$$\frac{RB_k}{N(N-1)} \leq C_k, \quad (4)$$

$$R_c = N(N-1) / B_{\max}. \quad (5)$$

因此, 降低网络中最大介数中心度 B_{\max} , 使所有节点的介数中心度的分布尽量均匀化是提高网络吞吐量的关键. 也就是说, 对于某一种路由策略而言, 最佳状态就是其最大介数中心度降到最小值. 如果 B_{\max} 还可以进一步减小, 那么当前的路由策略就还有继续优化的空间.

基于以上理论的研究与分析, 本文提出最优评判标准——“ B_{\max} 最低准则”: 如果经过 B_{\max} 节点的所有路径都无法找到不包括 B_{\max} 节点的替代路径, 说明 B_{\max} 已经降到最低, 那么当前的路由策略就是最优; 反之, 如果经过 B_{\max} 节点的路径中存在其中任何一条可以找到不包括 B_{\max} 节点的替代路径, 说明 B_{\max} 还有进一步降低的空间, 那么当前的路由策略就不是最优.

2.3 普适优化算法

基于最佳优化评判标准, 本文提出了评判与优化兼具的普适优化算法.

普适优化算法的关键在于寻找路径时避开网络中介数中心度最大的节点, 因此我们提出负载转移的思想, 并利用“暂弃点”的方法将负载最大限度地由 BC 值最大的节点转移到 BC 值小的节点. 其中, 网络中介数中心度为 B_{\max} 和 $B_{\max} - 1$ 的节点称为暂弃点. 所谓“暂弃”指的是当网络根据某一种路由策略建立起路由表之后, 暂时将介数中心

度为 B_{\max} 和 $B_{\max} - 1$ 的节点抛弃,也就是从网络中删除,然后遍历路由表,重新进行路径选择. 如果源节点 i 到目的节点 j 之间存在新的路径,在原路由表中更新记录,负载也随之转移到新路径中的节点; 如果无法找到从源节点 i 到目的节点 j 的路径,说明删掉的点是此条连接的必经之地,保留原路由表中的路径信息. 每更新一条路径就更新一次路由表,同时更新节点的介数中心度. 因为每次更新路由之后,节点的介数中心度必然发生变化,当进行下一条路径的更新时需要删除最新的 B_{\max} 和 $B_{\max} - 1$ 对应的节点.

B_{\max} 是评判路由策略是否最佳的关键,但是只删除 B_{\max} 对应的节点 i 时,如图 1 所示,可能会陷入死循环. 如果新选择的路径中含有 $B_{\max} - 1$ 对应的节点 j ,那么 j 就成为新的最大介数中心度节点. 而下次路径选择时, i 又有可能出现在替换路径中,继而形成死循环. 表面上网络中 B_{\max} 的值无法继续减小,但实际上可能仍有优化的空间. 因此为了避免此类死循环,普适优化算法中同时删除最新的 B_{\max} 和 $B_{\max} - 1$ 对应的节点.

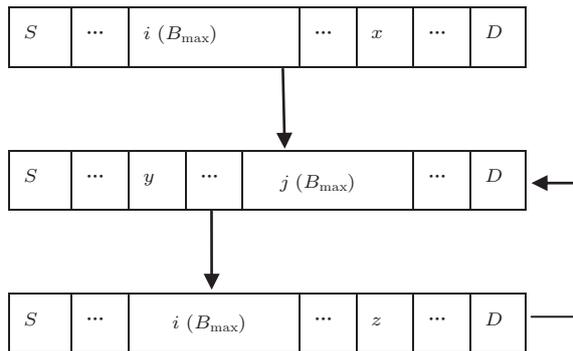


图 1 死循环示意图

假设节点 i 到 j 的任一条路径 $P(i \rightarrow j)$ 为 $P(i \rightarrow j) := i \equiv x_0, x_1, \dots, x_{n-1}, x_n \equiv j$, 该路径长度定义如下:

$$L(P(i \rightarrow j) : \alpha) = \sum_{k=0}^n [B_k + \alpha F(B_k)], \quad (6)$$

$$F(B_k) = \frac{1}{(B_{\max} - B_k)^2}, \quad (7)$$

使 $L(P(i \rightarrow j) : \alpha)$ 最小的路径就是被选择的最优路径,参数 α 是很大的正数. 由 (6) 和 (7) 式可知,当 B_k 比较小时, $F(B_k)$ 近似为 0,得到的路径长度 L 也比较小; 当 B_k 比较大接近 B_{\max} 时, $\alpha F(B_k)$ 是很大的正数,路径长度 L 也很大,可视之为对 k 节点传输负载过重的惩罚,其作用是在重新选择路径时尽量避开该节点,降低与其他节点的竞争力,将负

载转移到其他节点上去,从而减小节点介数中心度的冗余. 其中, $\alpha F(B_k)$ 称为惩罚项, α 称为惩罚因子. α 的取值视惩罚情况而定,显然 $\alpha = 0$ 时,退化为介数中心度和最小策略. 因此,此路径选择的方法我们称之为“惩罚选择法”.

算法的结束条件是连续两次遍历结束后 B_{\max} 的值相同,同时网络中对应最大介数中心度的节点也相同. 网络在重新遍历建立路由表时,对于包含 B_{\max} 节点的路径,无法找到不包含 B_{\max} 和 $B_{\max} - 1$ 节点的替代路径. 此时网络不能再进行优化,达到最优设计.

算法流程如下:

```

begin
根据已有的路由策略建立路由表 R_table;
统计节点的中心度,得到 B_max,并对节点进行排序;
do
% 遍历路由表
if 源节点 S 到目的节点 D 包含中心度为 B_max 的节点
then
暂时删除网络中 B_max 和 B_max - 1 对应的节点;
按照惩罚选择法寻找一条 S → D 的替代路径;
if 存在 S → D 的替代路径 then
更新 R_table;
更新中心度、B_max,对节点进行排序;
end
end
end
此次遍历与上次相比 B_max 值不同,或者中心度为
B_max 的节点不完全相同
end
    
```

3 仿真实验与结果分析

采用 BA 无标度网络建立网络模型 [27], 初始节点 $m_0 = 3$, 每增加一个节点,连 3 条边. 下面将从惩罚因子的取值、介数中心度分布和网络吞吐量等方面进行仿真实验,将本文的 AOR 与 SR、ER、中心度权值和最小策略(OP)以及 Danila 算法(DAN)进行比较.

3.1 α 取值对 B_{\max} 的影响

选取网络节点个数 $N = 100$, α 由 0 增至无穷大,通过多次仿真取平均值的方法,测量在不同 α 下网络最大介数中心度 B_{\max} 的变化趋势.

由图 2 可知,普适优化算法对四种现有路由策略优化后,网络最大介数中心度 B_{\max} 随着 α 的增大呈现大致相同的变化趋势. 当 α 增大到一定范围

之后, B_{\max} 稳定在一个固定的数值, 不再变化. 而且, 容易看出这个固定的数值基本上是 B_{\max} 的最小值, 此时网络路由达到最优状态. 同时, 在 B_{\max} 开始进入稳定状态时对应的 α 就是最佳惩罚因子的转折点. 所以一般在之后的仿真实验中, 节点个数 $N = 100$ 时, 对 SR, ER, OP 以及 DAN 进行优化时, 惩罚因子 α 分别选择 $\lg \alpha = 14$, $\lg \alpha = 11$, $\lg \alpha = 11$ 和 $\lg \alpha = 10$.

3.2 最大介数中心度及 BC 分布

最大介数中心度 B_{\max} 是评判路由策略是否最优的关键, B_{\max} 越小, 网络拥塞的可能性就越小. 普适优化算法采用“暂弃点”的方法寻找替代路径, 同时利用“惩罚选择法”避开 BC 比较大的节点, 确保 B_{\max} 最小.

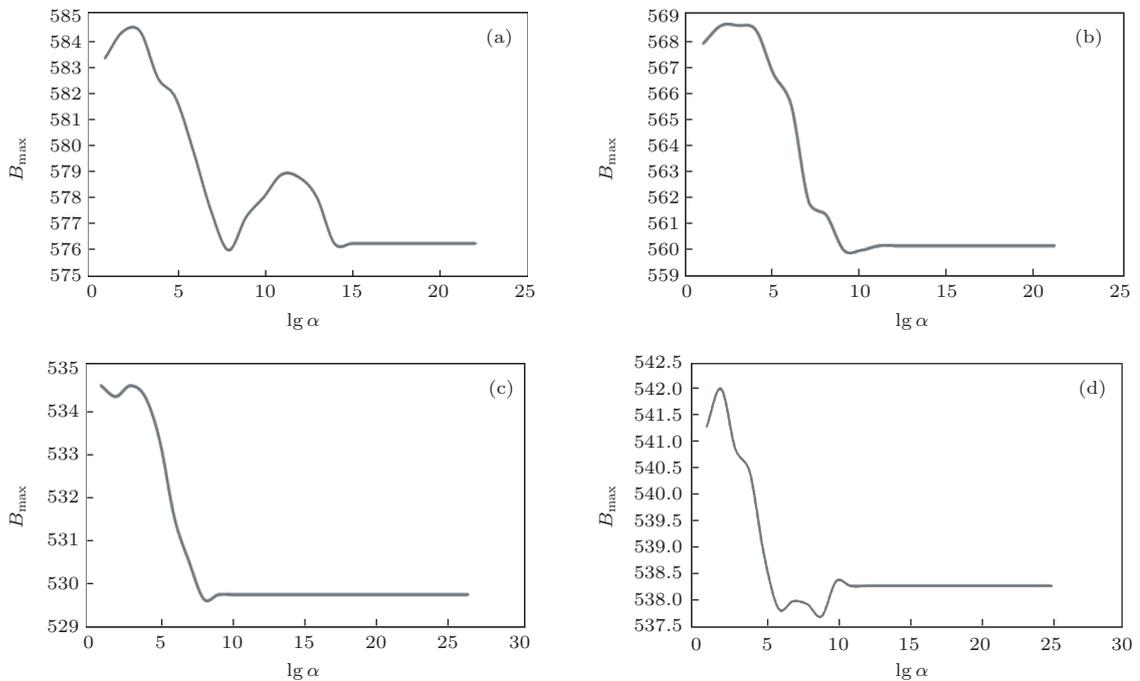


图2 普适优化算法对四种现有路由策略优化后 B_{\max} 随 α 的变化情况 (a) SR; (b) ER; (c) DAN; (d) OP

表1 普适优化算法改进前后 B_{\max} 的比较 ($N = 100$)

	SR	ER	DAN	OP
改进前 B_{\max}	3221	831	721	618
改进后 B_{\max}	670	591	556	502

3.3 网络吞吐量

单位时间内新增负载量达到临界值 R_c 后, 网络将由自由流状态进入拥塞状态, 一般借助有序参数 H 与 R 的关系来分析上述网络状态的变化, 如

表1是普适优化算法对现有四种经典路由策略的评判与改进后 B_{\max} 的比较. 可以看出, 四种路由策略的 B_{\max} 均有大幅度的下降, 显然都不是最优策略. SR由3221优化到670, 下降80%; ER, OP及DAN算法分别优化30%, 23%和19%.

降低网络中最大介数中心度 B_{\max} , 使所有节点的介数中心度的分布尽量均匀化是提高网络吞吐量的核心. 图3显示了四种路由策略在优化前后 BC 的分布情况. 最短路径策略的 BC 分布很不均匀, 有的节点 BC 值很大, 有的则很小, 传输负载的分担极不平衡. 显然, 经过普适优化算法的优化后 BC 值分布得到明显改善, 趋于均匀化. 虽然有效路由策略、中心度权值和最小策略及 Danila 算法较之最短路径策略来说 BC 值分布已经有所改善, 但是经过优化后 BC 值分布更加均匀了.

(8) 式所示

$$H(R) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{R} \frac{\langle \Delta W \rangle}{\Delta t}, \quad (8)$$

其中, $\Delta W = W(t + \Delta t) - W(t)$, $W(t)$ 为 t 时刻网络的总负载量, $\langle \dots \rangle$ 表示基于时间窗 Δt 的平均. 当 $R < R_c$ 时, 网络中总信息包量没有明显的增加, $\langle \Delta W \rangle = 0$, $H(R) = 0$; 当 $R > R_c$ 时, $\langle \Delta W \rangle > 0$, $H(R) > 0$, 网络处于拥塞状态, 且随着时间的推移, 拥塞状况也会迅速的扩散到整个网络, 因此 R_c 可以表征网络无拥塞的最大吞吐量.

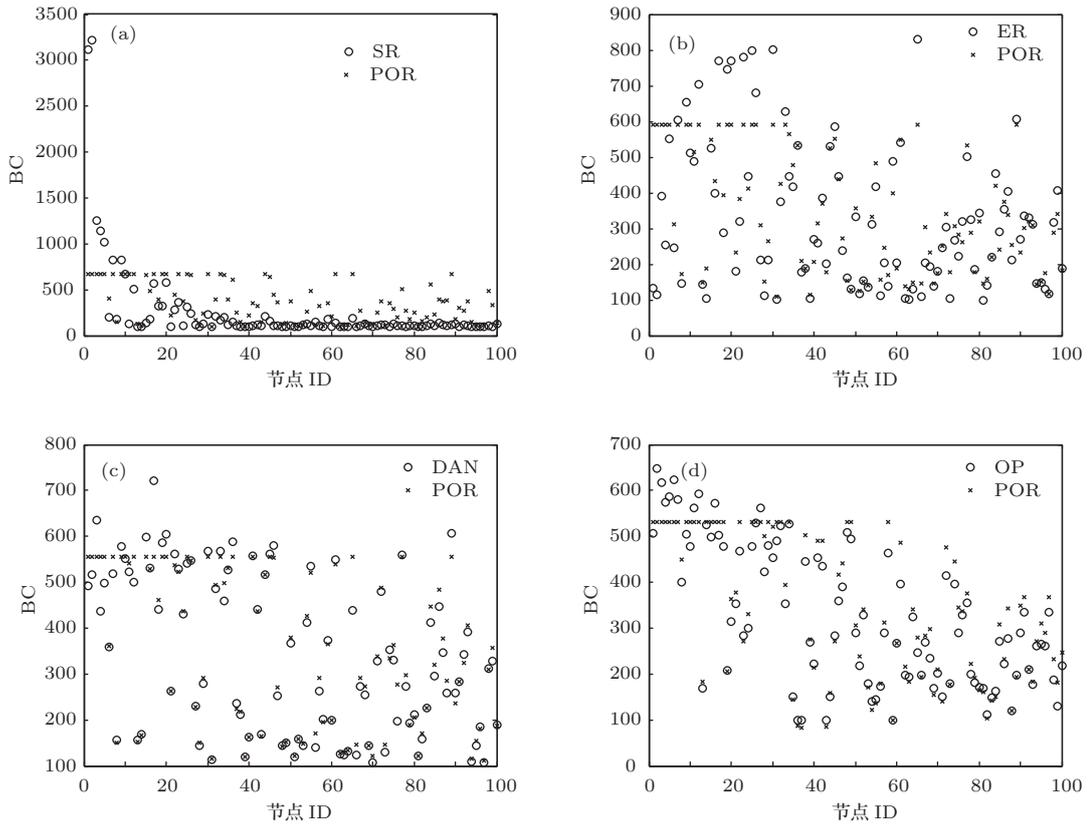


图3 普适优化算法改进前后网络节点BC值分布 ($N = 100$) (a) SR; (b) ER; (c) OP; (d) DAN

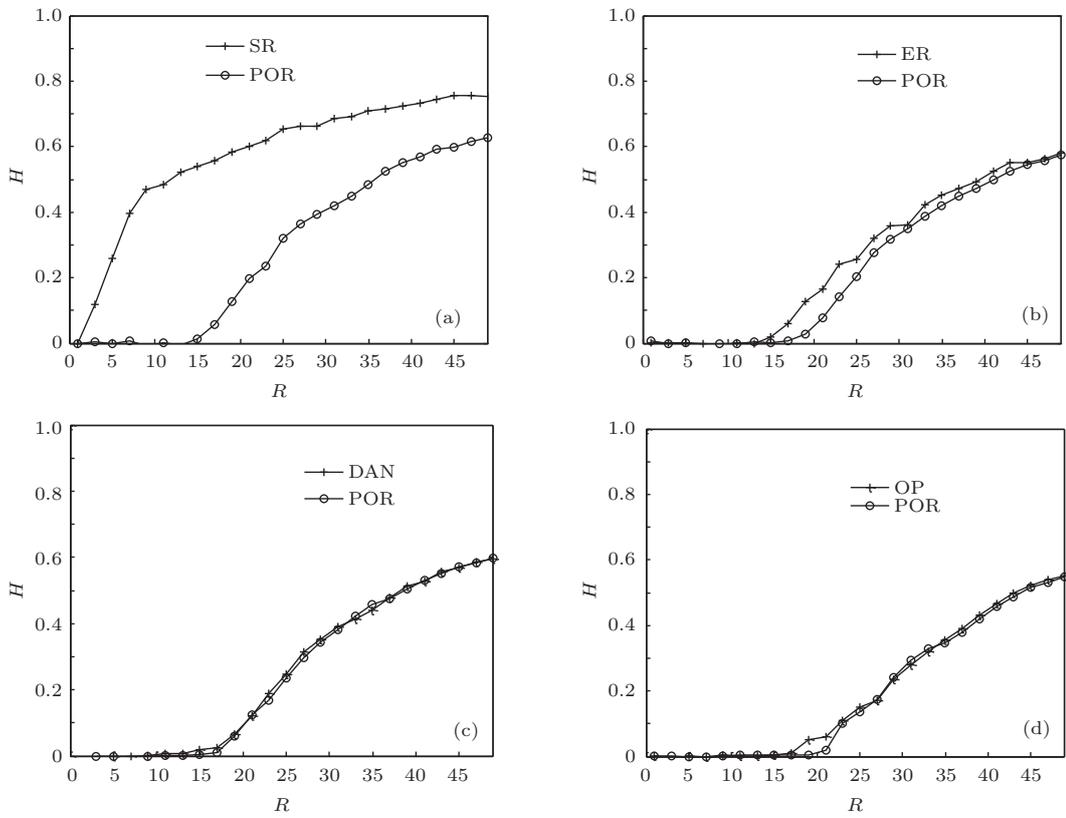


图4 普适优化算法优化前后H随R的变化情况 ($N = 100$) (a) SR; (b) ER; (c) OP; (d) DAN

图4是普适优化算法对四种现有路由策略进行评判和优化后的 H 与 R 的关系.可以看出,随着 R 增大到临界值 R_c ,投递成功的信息包数量小于新产生的信息包量,网络中滞留的信息包数量开始增加.如图4(a)所示,当 $R=1$ 时,最短路径路由策略的临界值出现,普适优化算法对其进行评判和优化后临界值出现在13,网络的吞吐量提高了13倍.而且网络节点个数越多,改进效果越明显,网络的吞吐量提高的越多.同时如图4(b)—(d)所示,普适优化算法也对有效路由策略、中心度权值和最小策略以及Danila算法有明显改进.

4 结 论

目前复杂网络中对路由策略的研究非常多,绝大多数的研究将重点放在如何建立高效的路由来提升网络的传输能力.但是,众多的路由策略中却不存在一个统一的标准来衡量当前的路由策略是否最优.本文提出了一种普适优化算法,给出了评判标准,并且在评判当前路由策略是否最优的同时,对其进行进一步的优化,极大地提高了网络的吞吐量.

在网络各个节点处理能力一定的情况下, R_c 是衡量网络传输能力的标准. R_c 产生在介数中心度最大的节点上,因此采用最大介数中心度 B_{\max} 能否进一步降低作为评判当前路由策略是否最优的标准.在评判的同时,利用负载转移的思想对已建立的路由表进行优化,并且选择合适的“惩罚因子”避开介数中心度相对较大的节点,尽可能地将负载从BC值大的节点转移到BC值小的节点,促使网络中节点的BC值分布最大程度地均匀化. B_{\max} 值无法降低时,当前路由达到最优状态,停止遍历.实验表明,普适优化算法在评判已有路由是否最优的同时,大大降低了 B_{\max} 值,使网络BC值分布更均匀,网络的传输性能达到最优.

参考文献

[1] Bai W J, Wang B H, Zhou T 2005 *Compl. Syst. Compl. Sci.* **2** 29 (in Chinese)[柏文洁, 汪秉宏, 周涛 2005 复杂系统与复杂性科学 **2** 29]

[2] 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]

[3] Li S B, Wu J J, Gao Z Y, Lin Y, Fu B B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 050701 (in Chinese)[李树彬, 吴建军, 高自友, 林勇, 傅白白 2011 物理学报 **60** 050701]

[4] Liu Z H, Ma W C, Zhang H, Sun Y, Hui P M 2006 *Physica A* **370** 843

[5] Wang K, Zhou S Y, Zhang Y F, Pei W J, Liu Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 118903 (in Chinese)[王开, 周思源, 张毅锋, 裴文江, 刘茜 2011 物理学报 **60** 118903]

[6] Zhou T 2008 *Physica A* **387** 3025

[7] Yan G, Zhou T, Hu B, Fu Z Q, Wang B H 2006 *Phys. Rev. E* **73** 046108

[8] Wang S P, Pei W J 2009 *Physica A* **388** 514

[9] Shao F, Jiang G P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 078902 (in Chinese)[邵斐, 蒋国平 2011 物理学报 **60** 078902]

[10] Danila B, Yu Y, Marsh J A, Bassler K E 2006 *Phys. Rev. E* **74** 046106

[11] Chen L, Chen J, Guan Z H, Zhang X H, Zhang D X 2012 *Physica A* **391** 3336

[12] Liu G, Li Y S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 108901 (in Chinese)[刘刚, 李永树 2012 物理学报 **61** 108901]

[13] Liu G, Li Y S, Zhang X P 2013 *Chin. Phys. B* **22** 068901

[14] Tang M, Zhou T 2011 *Phys. Rev. E* **84** 026116

[15] Ling X, Hu M B, Long J C, Ding J X, Shi Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 018904

[16] Hu M B, Lau H Y K, Ling X, Jiang R 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 128902

[17] Ramasco J, Marta S, Lopez E, Boettcher S 2010 *Phys. Rev. E* **82** 036119

[18] Chen H L, Liu Z X, Chen Z Q, Yuan Z Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6068 (in Chinese)[陈华良, 刘忠信, 陈增强, 袁著祉 2009 物理学报 **58** 6068]

[19] Li T, Pei W J, Wang S P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5903 (in Chinese)[李涛, 裴文江, 王少平 2009 物理学报 **58** 5903]

[20] Liu G, Li Y S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 248901 (in Chinese)[刘刚, 李永树 2012 物理学报 **61** 248901]

[21] Zhang G Q, Wang D, Li G J 2007 *Phys. Rev. E* **76** 017101

[22] Eisler Z, Kertesz J 2005 *Phys. Rev. E* **71** 057104

[23] Danila B, Yu Y, Marsh J A, Bassler K E 2007 *Chaos* **17** 026102

[24] Wang W X, Yin C Y, Yan G, Wang B H 2006 *Phys. Rev. E* **74** 016101

[25] Meloni S, Gomez-Gardenes J 2010 *Phys. Rev. E* **82** 056105

[26] Barthélemy M 2004 *Eur. Phys. J. B* **38** 163

[27] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509

A pervasive optimized algorithm for complex network routing strategy*

Li Shi-Bao Lou Lin-Lin[†] Chen Rui-Xiang Hong Li

(College of Computer and Communication Engineering, China University Of Petroleum, Qingdao 266580, China)

(Received 14 September 2013; revised manuscript received 4 October 2013)

Abstract

There are many existing routing strategies in complex networks, but there is no uniform standard to measure whether the strategies achieve optimal transmission effect. A pervasive optimized algorithm is proposed. The key factor restricting transmission capacity is maximum betweenness centrality and minimizing it becomes the uniform standard. In order to make betweenness centrality more evenly distributed and balance the traffic load of each node, we use punishment selection method to avoid the nodes with larger betweenness centrality. The simulation results show that the new algorithm could reduce maximum betweenness centrality of existing strategies and improve the network transmittability greatly.

Keywords: complex network, routing strategy, congestion, standard

PACS: 89.75.Hc, 89.75.Fb

DOI: [10.7498/aps.63.028901](https://doi.org/10.7498/aps.63.028901)

* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. 12CX04077A).

† Corresponding author. E-mail: lishibao@upc.edu.cn