

有效提高 Internet 传输性能的社团结构改善策略

蔡君^{1,2}, 余顺争²

(1. 广东技术师范学院 电子与信息学院, 广东 广州 510665; 2. 中山大学 电子与信息工程系, 广东 广州 510006)

摘要: 提出一种增添能最有效减弱网络社团特性的边以提高 Internet 网络传输性能的策略, 即减弱社团结构策略 (WCS 策略), 并基于光逻辑链路可以提供与实际物理链路相当的高性能, 以实现 WCS 策略的 Internet 网络的拓扑重构。在伪随机网络、具有社团结构的无标度人工网络 and 实际 Internet 网络上分别进行了基于全局最短路径路由和局部路由的实验。实验结果表明, 利用 WCS 策略在社团之间少量边的添加, 就能实现网络负载能力和平均最短路径的大幅改善。

关键词: 复杂网络; 社团特性; 信息传输; 模块度

中图分类号: TP393.0

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)04-0171-09

Improving community structure strategy for efficiently enhancing Internet transmission performance

CAI Jun^{1,2}, YU Shun-zheng²

(1. School of Electronic and Information, Guang Dong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China;

2. Department of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: An efficient weakening community structure strategy (WCS) by adding links to the existing networks was propose, which could enhance Internet transmission performance. Internet topology reconstruction could be realized by WCS strategy, because lightpaths that represent logical links between nodes could achieve the same high performance as physical links by means of optically bypassing intermediate nodes. The performance of the proposed strategy was investigated in pseudo random networks with community structure, scale-free network with community structure and Internet topology respectively, for both local routing strategy and global shortest-path routing strategy. The experimental results show that the traffic capacity of networks and the average shortest path are considerably improved by adding a few links among communities.

Key words: complex network; community structure; information transfer; modularity

1 引言

Barabási 和 Albert 的无标度网络模型、Watts 和 Strogatz 的小世界网络模型揭示了网络结构的本质规律, 在过去的 10 多年里, 推动了复杂网络研究的迅速发展。进一步的研究发现, 多数现实网络

是不均匀的, 由许多子网络组成。子网络内节点之间的连接比较紧密, 而子网之间节点的连接比较稀疏, 这一现象在人工网络和自然网络中都比较常见, 称之为网络中的社团结构 (community structure)。社团结构成为了继小世界和无标度特性之后复杂网络中普遍和重要的拓扑结构属性之一^[1]。随着复杂网

收稿日期: 2012-09-25; 修回日期: 2012-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60970146, 61070154, 61202271, 61272381); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(2007AA01Z449); 国家自然科学基金—广东联合基金资助项目(U0735002); 广东省自然科学基金资助项目(S2012040007184)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60970146, 61070154, 61202271, 61272381); The National High Technology Research Development Program of China (863 Program) (2007AA01Z449); The Key Program of NSFC—Guangdong Joint Funds(U0735002); The Natural Science Foundation of Guangdong Province(S2012040007184)

络理论的不断成熟,研究者对很多复杂的互连系统,包括 Internet、World Wide Web(WWW)等各种网络,都从复杂网络的视角去研究其统计特征和实际应用^[2]。对 Internet 网络结构的实证研究显示,Internet 网络结构不仅具有无标度特性^[3],而且社团结构明显^[4]。

随着现代通信的迅速发展,网络上的负载越来越多,如何快速有效地提高网络的传输性能受到了研究人员的普遍关注。人们提出了各种网络传输策略,主要分为两类。一类是“软”策略,即在整个过程中无需网络拓扑结构的改变,如:针对网络的无标度特性,李涛等人^[5]提出了一种基于节点度的优化路由策略,Pu 等人^[6]提出了一种基于与节点度相关的成本函数选择节点之间最优路径的路由策略。针对网络的社团特性,Danon 等人^[7]基于社团结构降低最短路径路由策略下传输能力的性质,提出了一种通过将社团结构信息提供给数据分组来提高网络承载能力的路由策略。邵斐等人^[8]提出了一种减少最短路由经过的社团数量的负载传输策略。以上“软”策略在某一特定的拓扑结构中对网络性能的改善是有效的,但许多实证研究结果显示,Internet 网络的传输性能不仅受路由策略的影响,而且在很大程度上依赖于网络拓扑的结构^[9,10],例如,Zhao 等人^[11]发现对于 2 个不同结构的网络,即使网络具有相同的节点和平均度以及每个节点具有相同的分发处理能力,网络的负载能力也可能不同。第二类是“硬”策略,即直接优化或改善网络拓扑结构,提高网络性能。如:R.Guimerà 等人^[12]提出了一种在固定节点和边的数量下构建能兼顾网络拥塞和搜索的最优网络拓扑的策略,其研究表明,当网络处于非阻塞阶段,中心化的网络拓扑结构其搜索性能是最优的,而当网络处于阻塞阶段,全分布式非结构化拓扑有利于负载在节点之间的均衡,为后续通信网络的设计、优化提供了参考。最近,Liu 等人^[13]和 Huang 等人^[14]分别通过不同的方法删除连接度大的节点之间的链路,提高无标度网络的负载传输性能,但这 2 种方法都以增加网络的平均最短路由路径和数据分组的平均传输时间为代价。

由于现有 Internet 网络具有明显的社团结构特征,并且模糊社团结构的网络拓扑更适合网络信息的传输^[7]。因此,本文从复杂网络特性改善的视角出发,提出了一种在网络的社团之间增添“捷径”

改善网络社团特性,提高 Internet 网络传输性能的“硬”策略。到目前为止,考虑到成本和实施难度,增添链路改善网络性能的有效性在其他网络中鲜有研究。而最近的研究显示,WDM 光传输网络通过使用光旁路、可调收发器、光交换机和波长变换器,已经具备了逻辑拓扑重构的能力,且节点之间的逻辑光链路可以获得与实际的物理链路相当的高性能^[15]。所以可以很容易地利用 WDM 光传输网络技术进行 WCS“硬”策略的“软”实现。本文在伪随机网络、具有社团结构的无标度人工网络 and 实际 Internet 网络上基于全局最短路径路由和局部路由进行了实验。实验结果表明,WCS 策略能达到有效减弱网络社团特性,提高 Internet 网络的传输性能的目的,在具有社团结构的无标度网络上对网络传输性能的改善结果尤其明显。

2 相关模型与参数

2.1 网络负载传输模型

本文的网络负载传输模型构建方式如下:每个时刻 t ,每个节点以概率 r 产生一个数据分组,每个新产生的数据分组,以随机方式选择它的目的节点(与源节点不同)。假定每个节点都兼有终端和路由功能,能产生、接收和转发数据分组,并且处理能力相同,每个时刻能处理 C_i 个数据分组,每个节点的存储能力没有限制,可以容纳任意长的数据分组等待队列,在同一节点等待传输的数据分组的发送规则为先进先出,在接下来的 $t+1, t+2, \dots, t+T$ 时刻,数据分组向目的节点传输,一旦到达目的节点,则从该网络中离开。

当网络处于无阻塞状态,任意节点都没有数据分组的聚集。随着网络中节点产生数据分组的概率 r 增大,网络将由无阻塞状态进入阻塞状态,其存在一个临界值 r_c ,当 $r < r_c$ 时,网络中产生的数据分组和传输的数据分组基本相同,网络处于无阻塞状态;当 $r > r_c$,网络中产生的数据分组将大于其传输的数据分组,网络将出现阻塞。为此,可使用有序参数 h 与 r 的关系来分析上述网络状态的变化^[9]。

$$h(r) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\langle \Delta W \rangle}{r N \Delta t} \quad (1)$$

其中, N 为网络中的节点数, $\langle \Delta W \rangle = W(t + \Delta t) - W(t)$, $W(t)$ 为 t 时刻网络中数据分组的总数, $\langle L \rangle$ 为基于时间窗口 Δt 的平均。当 $r < r_c$, $\Delta W = 0$ 和

$h = 0$ 时，网络处于无阻塞状态。由此可见，节点数据分组的临界产生概率 r_c 能够很好地反映网络负载的处理能力。

在网络无阻塞状态，任意节点 j 接收到的数据分组为^[16]

$$R_j = r B_j / (N - 1) \quad (2)$$

其中， B_j 为节点 j 的有效介数，定义为

$$B_j = \sum_{m,k \in N, m \neq k} \frac{n_{mk}(j)}{n_{mk}} \quad (3)$$

其中， n_{mk} 为在特定传输策略下，节点 m 、 k 之间的总路径数， $n_{mk}(j)$ 为节点 m 、 k 之间的总路径数中经过节点 j 路径的数目。令 $C_i=1$ ，当 $R_j < 1$ 时，节点 j 产生的数据分组和传输的数据分组基本相同，节点 j 处于自由状态；当 $R_j > 1$ ，节点 j 产生的数据分组大于其传输的数据分组，节点 j 将出现阻塞。 r_c 可以用以下公式进行估计

$$r_c = (N - 1) / B_{\max} \quad (4)$$

其中， B_{\max} 为网络中介数的最大值，对应于网络中最中心的节点。 r_c 越大，网络的负载能力越强。

本文分析了 WCS 策略在全局路由策略和局部路由策略 2 种情况下对网络性能的改善。全局路由策略指源节点和目标节点之间采用最短路径传送数据分组。局部路由策略采用如下方式^[17]：每个节点在它们的邻近节点之间进行局部搜索，如果数据分组的目的节点在其搜索的范围，则直接发给目的节点。否则，根据式(5)的概率发给邻居节点。

$$P_i = \frac{k_i^a}{\sum_j k_j^a} \quad (5)$$

其中， k_i 为节点 i 的度， a 为可调节的控制参数。

2.2 社团定义与评价指标

社团定义为网络中的一种子结构。在社团内部，节点之间连接相对紧密，而在社团之间，节点之间的连接则相对稀疏^[18]。为量化复杂网络的社团结构，本文采用了目前应用最为广泛的由 Newman 等人提出的网络社团量化指标——模块度 (modularity) (简称 Q 值)，其定义如式(6)^[18, 19]所示。

$$Q = \sum_{c=1}^{N_c} \left(\frac{m_c}{M} - \frac{d_c^2}{4M^2} \right) \quad (6)$$

其中， N_c 表示网络中社团的数目， M 表示网络中连

接的总数， m_c 表示社团 C 内节点之间的连接数， d_c 表示社团 C 内所有节点度数之和。 Q 值的上限为 1， Q 值越高，表示复杂网络社团特性越明显。

3 WCS 策略分析

本文通过添边以减弱网络社团特性、重构 Internet 网络结构来提高网络的传输性能。假定添边 $e=(u, v)$ 分别连接网络中已存节点 u 和 v ，从社团的视角，边 e 的添加有 2 种可能：边 e 添加于社团内部；边 e 添加于社团之间。下面对这 2 种情况分别加以讨论。

3.1 社团内部边的添加

如果边 e 添加于社团内部，根据命题 1，网络的社团特性将增强。

命题 1 在网络中最小社团 (即节点度数之和最小的社团) 内增边，网络的社团特性将增强。

证明 令 $n = M - \sum_c m_c$ 和 $e_c = d_c / 2$ ，则式(6)

可表示为

$$Q = 1 - \frac{n}{M} - \frac{1}{M^2} \sum_c (e_c)^2 \quad (7)$$

其中， $M = \sum_c e_c$ ，每个节点当且仅当属于一个社团^[20]。当边 e 增添于网络中社团 r 后，模块度变为 Q' ，其值为

$$Q' = 1 - \frac{n}{M+1} - \frac{1}{(M+1)^2} \left(1 + 2e_r + \sum_c (e_c)^2 \right) \quad (8)$$

在这个过程中，模块度的变化量 ΔQ 为

$$\begin{aligned} \Delta Q &= Q' - Q \\ &= \frac{n}{M(M+1)} + \frac{1}{M^2(M+1)^2} \cdot \\ &\quad \left((M^2 + 2M + 1) \sum_c (e_c)^2 - M^2 (1 + 2e_r + \sum_c (e_c)^2) \right) \\ &= \frac{1}{M^2(M+1)^2} \cdot \\ &\quad \left(nM(M+1) + (2M+1) \sum_c (e_c)^2 - M^2 (1 + 2e_r) \right) \end{aligned}$$

当 $e_r = \min\{e_c\}$ 时，得

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \frac{1}{M^2(M+1)^2} \{ (n-1)M^2 + nM + \\ &\quad 2M \{ \sum_c (e_c)^2 - Me_r \} + \sum_c (e_c)^2 \} \end{aligned}$$

$$\frac{1}{M^2(M+1)^2} \{ (n-1)M^2 + nM + \sum_c (e_c)^2 \}$$

可见, 当 $n \geq 1$ 时, 即网络中至少有 2 个社团时, 在网络中最小社团内添边, 网络社团特性将增强。

3.2 社团之间边的添加

由命题 2 可知, 在社团之间添边网络的模块度将减少。为找出最能减弱网络社团特性的链路, 在每次添加一条边后, 需继续保持社团的划分为最佳。但是当添边完成后, 添边的两端节点有可能加入邻近社团^[21]。若每次增添一条边后, 便在网络内利用社团探测算法重新进行一次社团划分, 这样产生的计算量太大。因此, 根据命题 3 来判断添边节点的社团归属。

命题 2 在 2 个最大的网络社团之间添加一条边, 将使得模块度减小。证明如下。

$$\text{令 } d_c = \max_i \{d_i\}, d_d = \max_{i \neq c} \{d_i\}.$$

在社团 C 和社团 D 之间增加一条边, 则由式(7)可知, 新的模块度为

$$Q' = 1 - \frac{n+1}{M+1} - \frac{1}{4(M+1)^2} \left((d_c+1)^2 + (d_d+1)^2 + \sum_{i \neq C, D} d_i^2 \right)$$

与添边之前的模块度 Q 相比, 有

$$\begin{aligned} Q - Q' &= \frac{n+1}{M+1} - \frac{n}{M} + \frac{1}{4(M+1)^2} \cdot \\ &\quad \left(2d_c + 2d_d + 2 + \sum_i d_i^2 \right) - \frac{1}{4M^2} \sum_i d_i^2 \\ &= \frac{M-n}{M(M+1)} - \frac{2M+1}{4M^2(M+1)^2} \sum_i d_i^2 + \frac{d_c+d_d+1}{2(M+1)^2} \\ &= \frac{M-n}{M(M+1)} + \frac{2M^2(d_c+d_d+1) - (2M+1) \sum_i d_i^2}{4M^2(M+1)^2} \\ &= \frac{M-n}{M(M+1)} + \frac{2M^2(d_c+d_d+1) - (2M+1) \sum_i d_i(d_c+d_d)/2}{4M^2(M+1)^2} \\ &= \frac{M-n}{M(M+1)} + \frac{2M^2(d_c+d_d+1) - M(2M+1)(d_c+d_d)}{4M^2(M+1)^2} \\ &= \frac{M-n}{M(M+1)} + \frac{2M^2 - M(d_c+d_d)}{4M^2(M+1)^2} \\ &= \frac{M-n}{M(M+1)} + \frac{2M - (d_c+d_d)}{4M(M+1)^2} > 0 \end{aligned}$$

即 $Q > Q'$ 。证毕。

命题 3 假定边 $e=(u, v)$ 分别连接社团 $C(C \equiv C(u))$ 和社团 $D(D \equiv C(v))$ 内的节点 u 和 v 。定义节点 u 的邻居社团为与其有连接节点的社团, 用集合 $\{ngbu\}$ 表示。如果 $F_{C(in)}^{(u)} > F_{T_{max}(out)}^{(u)}$, 则节点 u 的社团归属不发生改变, 继续留在社团 C 中, 否则节点 u 的社团归属将发生改变, 划入社团 T_{max} 内。节点 v 的情况与节点 u 类似。

证明 由式(6), 定义社团 C 对其内部节点 u 的吸引力如式(9)所示, 节点 u 的邻居社团(与节点 u 有连接的社团)对节点 u 的吸引力如式(10)所示。

$$F_{C(in)}^{(u)} = \frac{1}{M} \left(e_{C(in)}^u - \frac{d_u(d_c - d_u)}{2M} - \frac{d_u^2}{4M} \right) \quad (9)$$

$$F_{T_{max}(out)}^{(u)} = \max_{T \in \{ngbu\}} \frac{1}{M} \left(e_{T(out)}^u - \frac{d_u d_{T \setminus u}}{2M} - \frac{d_u^2}{4M} \right) \quad (10)$$

其中, $e_{C(in)}^u$ 和 $e_{T(out)}^u$ 分别表示节点 u 与社团 C 和社团 T 内节点的连接数, d_c 和 $d_{T \setminus u}$ 分别表示包含节点 u 的社团 C 和不包含节点 u 的社团 T 内所有节点度数之和, $\{ngbu\}$ 表示节点 u 的邻居社团的集合。节点 u 分配于社团 C 内的条件是满足 $F_{C(in)}^{(u)} > F_{T_{max}(out)}^{(u)}$ 。当边 $e=(u, v)$ 添加于网络后, 由式(9)和式(10)可知, 社团 C 和社团 T 对节点 u 的吸引力变为 $F_{C(in)}^{(u)}$ 和 $F_{T_{max}(out)}^{(u)}$ 。如果满足 $F_{C(in)}^{(u)} > F_{T_{max}(out)}^{(u)}$, 节点 u 的社团归属不变, 否则节点 u 划入社团 T_{max} 。

3.3 WCS 策略

根据上两节的分析, 能减弱社团特性的边只可能添加于社团之间。首先, 利用社团探测算法, 将初始网络 G_{s_0} 划分为不同社团, 得到节点的社团分配矩阵 $C_0 = (c_{ik} : i \in \{1, L, n\}, k \in \{1, L, K\})$, 其中 $c_{ik} = 1$ 表示节点 i 属于网络的第 k 个社团, 否则为 0。目前, 研究者们在不同的应用领域, 针对复杂网络社团的探测, 提出了许多算法^[22]。考虑到社团的数量未知且对其进行划分的准确性要求较高, 本文采用了由 Newman 等人提出的基于局部搜索的快速复杂网络聚类算法 FN^[23], 获得节点的社团分配矩阵。然后, 在社团之间添加减弱网络社团特性的边, 计算每次添边后网络模块度的增量 ΔQ ($\Delta Q = Q_{\text{添边后}} - Q_{\text{添边前}}$), 并根据 ΔQ 的大小排序得到减弱网络社团特性的添边集合(AL)。由式(4)可知, 较大节点的介数影响网络的负载能力, 而连接具有较大节点介数的边介数也较大。基于此, 在具有相同 ΔQ 的情况

下，先添加介数较小的边。研究显示边的介数与边的 $k_m \times k_n$ (为描述方面，用 $R(m, n)$ 表示 $k_m \times k_n$ 的值) 的值具有很强的相关性(近似线性)^[24]，其中 k_m 和 k_n 分别表示节点 m 和 n 的度，而 $R(m, n)$ 与边的介数相比，计算简单、获得方便。因此，每次添加最能减弱社团特性的 $R(m, n)$ 值最小的边。如果满足条件的边数目大于 1，通过随机方式进行选择。添边完成后，形成一个新的网络 G_{new} 和新的社团分配矩阵 C_{new} 。重复以上过程，直到网络的社团特性改善到预定目标。每次添边的伪码描述如下。

算法 1 (WCS 策略)

输入：网络的邻接矩阵和节点的社团分配矩阵 $C=\{c_{ik}\}$ ， $i \in \{1, L, n\}, k \in \{1, L, K\}$ 。

输出：社团之间的添边 $AL(i, j)$ 。

```

for m=1 to K do
  for n=m+1 to K do
    iteration u ∈ C(m), v ∈ C(n) do
      Determine u' and v' best community
      计算 ΔQm(u)n(v) = (QC' + QD') - (QC + QD)
      保存 ΔQm(u)n(v) 和 R(m, n)
    end iteration
  end for
end for
Sort( Q, R ) %以 Q 为主顺序, R 为次顺序进行排序。

```

3.4 策略时间复杂度分析

假定一个有 n 个节点， m 条边， K 个社团的网络，平均每个社团内的节点数为 n/K ，其中 $K = n$ 。在算法 1 的主循环当中，的时间复杂度为 $O\left(\frac{n}{K} \times \frac{n}{K}\right)$ ，和的时间复杂度都为 $O(1)$ 。故算

法的主循环执行一遍的时间复杂度为 $O\left(\frac{n}{K} \times \frac{n}{K}\right)$ 。

结合算法的 和，对社团之间的节点遍历一次运行时间为 $O(n^2)$ 。算法 1 主循环之外的的时间复杂度为 $O\left(\frac{nk}{2} \text{lb}\left(\frac{nk}{2}\right)\right)$ 。综合起来，WCS 策略总的运行时间为 $O(n^2)$ 。

3.5 WCS 策略实现的简单描述

Internet 网络拓扑可以标记为无权无向网络 $G_s=(N_s, E_s)$ ，其中 N_s 表示网络中节点的集合，对应于网络中的交换机或路由器， E_s 表示节点之间连接的集合，对应于节点之间的物理链路，如图 1(a)所示。图 1(a)的网络模块度 $Q=0.41$ 表明其具有明显的社团特性，此时网络节点数据分组的临界产生概率 $r_c=0.149$ ，平均最短路径 $L_{\text{AVG}}=2.70$ 。应用 WCS 策略，在社团 1 内的节点 d 与社团 2 内节点 k 之间增添逻辑链路，即数据分组以光旁路的方式快速地穿过中间节点 a 、 g 和 j ，不送到高层去处理，实现节点 d 、 k 之间的逻辑互连，得到与物理链路相当的高性能，如图 1(b)所示。此时，网络对应参数 $Q=0.28$ ， $r_c=0.219$ ， $L_{\text{AVG}}=2.36$ 。可见网络的社团特性减弱，网络的传输性能得到明显改善。

4 实验结果与分析

4.1 在伪随机网络中的验证

在基于 ER 模型生成的伪随机网络上分析了网络的模块度 Q 值对网络的平均最短路径 L_{AVG} 和最短路径路由策略下的网络节点数据分组的临界产生概率 r_c 的影响，并且验证了 WCS 策略对伪随机网络传输性能的改善效果。伪随机网络的产生方式如下：由 128 个节点组成，划分为 4 个社团，每个社团内的节点均为 32 个。社团内节点之间连接的概率为 p_{in} ，社团之间节点连接的概率为 p_{out} ， Z_{in} 表示节点与它所在社团内部节点连边数目的期望值， Z_{out} 表示节点与社团外节点连边数目的期望值，且整个网

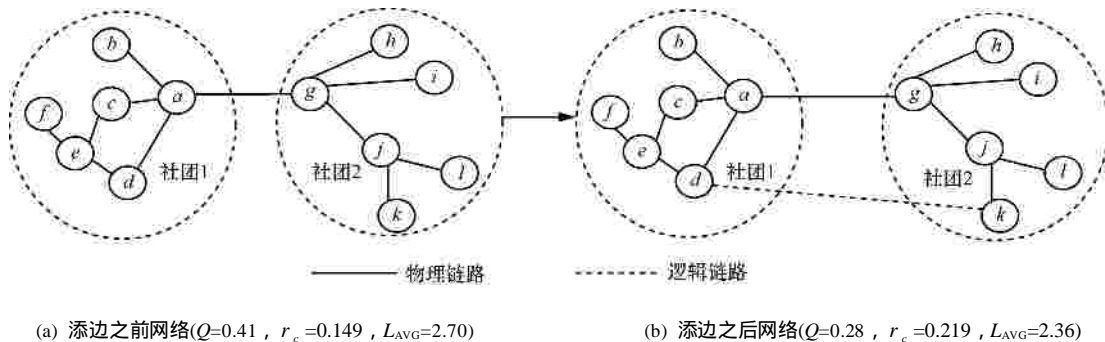


图 1 WCS 策略实现的简单实例

络节点度的期望值保持为 16。随着 Z_{in} 从 0 开始不断增加,网络的社团结构由模糊变为清晰,当 $Z_{in}>8$ 时,网络开始具有明显的社团结构,如图 2 所示。接下来在实验中,通过调节 Z_{in} 的大小产生不同的伪随机网络进行分析(本文中仿真结果的数值是进行 10 次仿真后的平均值)。从图 3 和图 4 可以看出,随着 Z_{in} 的增大, L_{AVG} 逐渐增大, r_c 逐渐减少,且 L_{AVG} 增大和 r_c 减少的曲线斜率也增大。结果表明,随着网络模块度 Q 值的增大,网络在最短路径路由策略下的传输性能加速降低。以 $Z_{in}=14$ 生成的网络为例,应用 WCS 策略减弱网络社团结构,社团之间增添链路比例 L_a 与 Q , L_{AVG} 和 r_c 之间的关系如图 5~图 7 所示。由图可得,随着 L_a 的增加, L_{AVG} 减少和 r_c 增加的速度变慢。在此期间 Q 减少了约 33.1%, r_c 增加了约为 112.5%, 而 L_{AVG} 减少了约 12.5%。

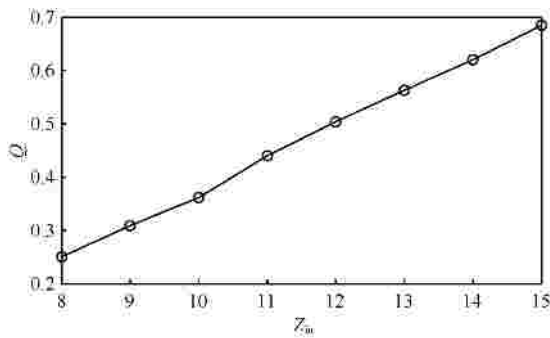


图 2 网络模块度 Q 与 Z_{in} 关系

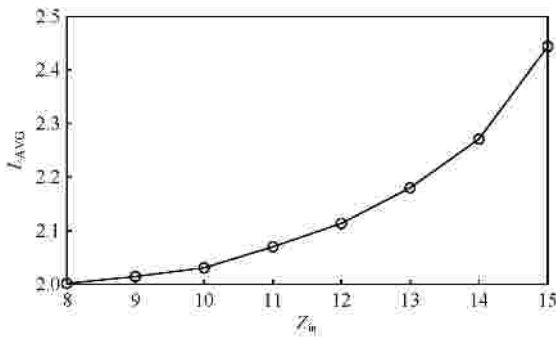


图 3 平均最短路径 L_{AVG} 与 Z_{in} 的关系

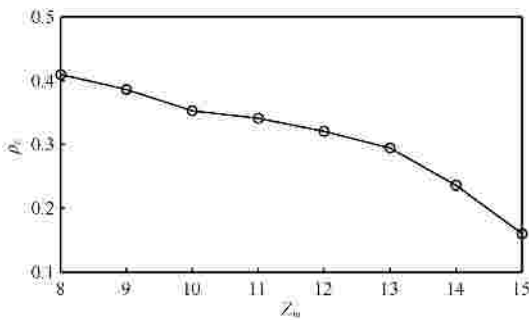


图 4 r_c 与 Z_{in} 的关系

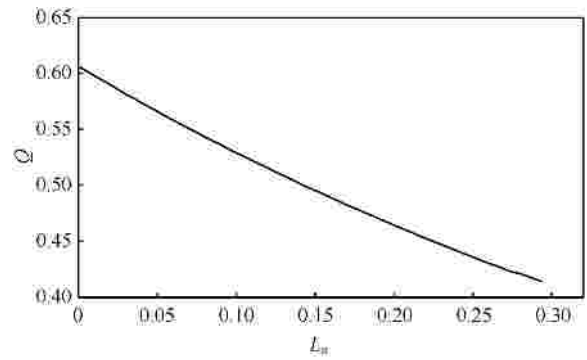


图 5 Q 与 L_a 的关系

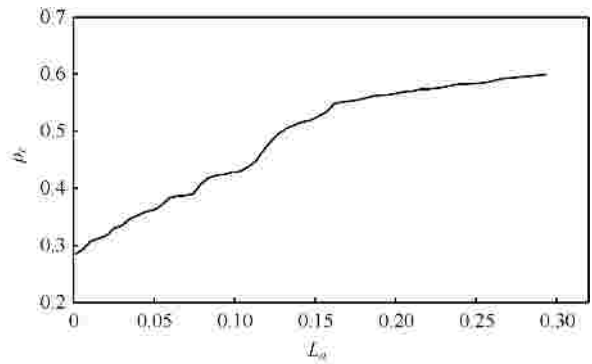


图 6 r_c 与 L_a 的关系

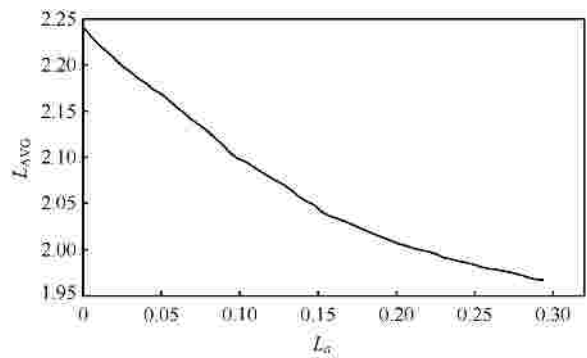


图 7 L_{AVG} 与 L_a 的关系

由此可见, WCS 策略对伪随机网络的负载能力和平均路径长度改善的作用明显,但受网络社团结构明显程度的影响。

4.2 在无标度网络中的验证

由于随机网络不能反映现实 Internet 网络的异构特性,本文引用了由 XIE 等人提出的 CBEN 模型^[25],该模型生成的网络不仅全网节点的度和社团内节点的数目都具有无标度特征,而且网络社团特性明显,与现实中 Internet 网络比较接近。选择合适参数生成模块度 $Q=0.63$ 的 1 000 个节点的网络,标记为 Net_1 。首先分析 WCS 策略对 Net_1 网络在最短路径路由策略下对其传输性能的改善,并与在网络中随机添边策略(RS)进行比较。如图 8 所示,在 RS

方式下，虽然随着增添链路比例 L_a 的增加，网络模块度 Q 值也呈变小的趋势，但与 WCS 策略相比，其变小的速度相对较慢，并且在变小的过程中有波动。如图 9 所示，不管是采用 RS 策略还是 WCS 策略，在网络中添边，网络的平均最短距离都会减少，但是采用 WCS 策略导致网络平均最短距离减少的速度比采用 RS 策略快。图 10 为在 RS 策略和 WCS 策略下的网络负载能力的改善效果，如需通过 RS 策略下达到与 WCS 策略下相同的效果，则需在网络中添加更多的边。由以上分析可知，WCS 策略在最短路径路由策略下，不仅可以提高网络的负载能力，还可以减少网络的最短平均距离，其效果远优于 RS 策略。导致这一结果的原因是：在具有社团特性的无标度网络中，社团内连接相对紧密，社团之间连接相对稀疏，这样，在最短路径路由策略下，造成阻塞的节点一般位于连接不同社团的介数较大的节点上，而 WCS 策略在不同社团内选择节点，并选择介数较小的链路进行连接，以减弱网络社团特性，相当于减少了社团之间的介数最大的链路。因此，WCS 策略在减弱社团特性的同时提高了 Internet 网络的负载传输性能。而 RS 策略选择的连接节点有可能来自于同一个社团，并且可能在介数较大的节点之间增添链路，这样不仅不会提高网络的负载容量，还有可能降低网络的负载容量。

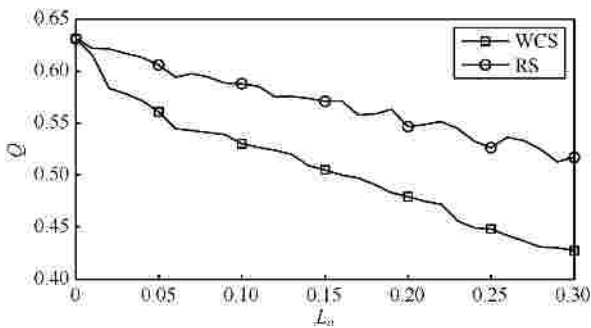


图 8 Q 与 L_a 的关系

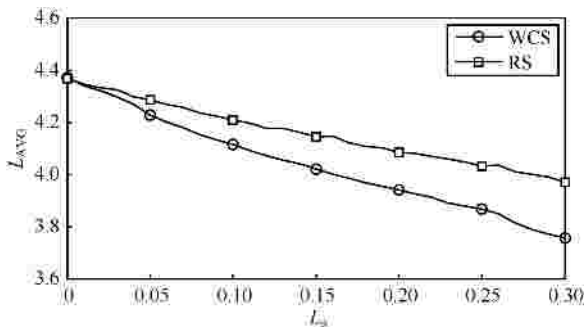


图 9 L_{AVG} 与 L_a 的关系

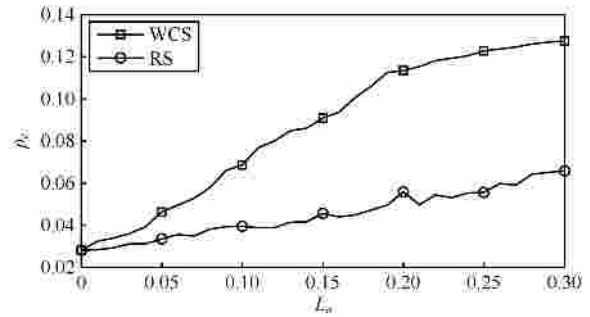


图 10 r_c 与 L_a 的关系

接下来，选择合适模型参数生成模块度 $Q=0.51$ 的 1 000 个节点的网络，标记为 Net_2 。 Net_2 的社团特性比 Net_1 弱。 2 个网络的 r_c 与 L_a 的关系如图 11 所示。如图 11 可得，虽然随着增添链路比例 L_a 的增加，2 个网络的 r_c 值都得到提升，但若在网络中增添相同比例的链路，网络社团特性相对较强的 Net_1 的网络负载能力改善的效果要优于 Net_2 。随后，在 Net_1 和 Net_2 网络中，观察了 WCS 策略对网络的模块度和网络的平均最短距离的影响，得到与负载能力改善效果相似的结论，即对 Net_1 改善的效果优于 Net_2 。由此可见，网络的社团结构越明显，WCS 策略改善网络性能的效果越显著。

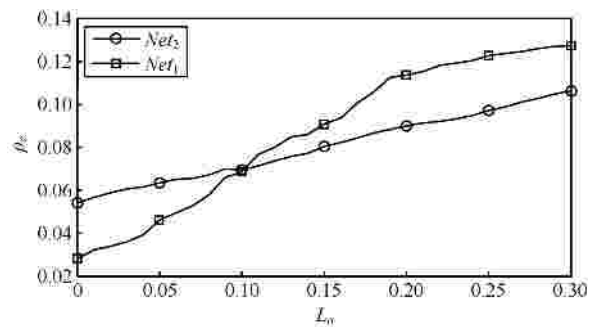


图 11 不同模块度下 r_c 与 L_a 的关系

下面分析在局部路由方式下，WCS 策略对网络性能的改善，主要观察在应用 WCS 策略过程中 L_a 、 r_c 和 a 这 3 参数之间的变化关系。如图 12 所示，可控参数 a 分别设置为 -3、-1 和 2。当 $a = -3$ 时，与 RS 策略比较，WCS 策略能快速提升网络的负载容量 r_c 的值，当 $L_a=0.3L$ 时，WCS 策略所能提高的 r_c 值大约是 RS 策略作用的 3.5 倍。当 $a = -1$ 时，与可控参数 $a = -3$ 时相比，WCS 策略相对于 RS 策略在提升网络负载容量方面的优势大为减弱。当 $a = 2$ 时，WCS 策略虽然也能提高网络的负载容量，但与 RS 策略比，其优势已经不是非常明显。 L_a 、 r_c 和 a

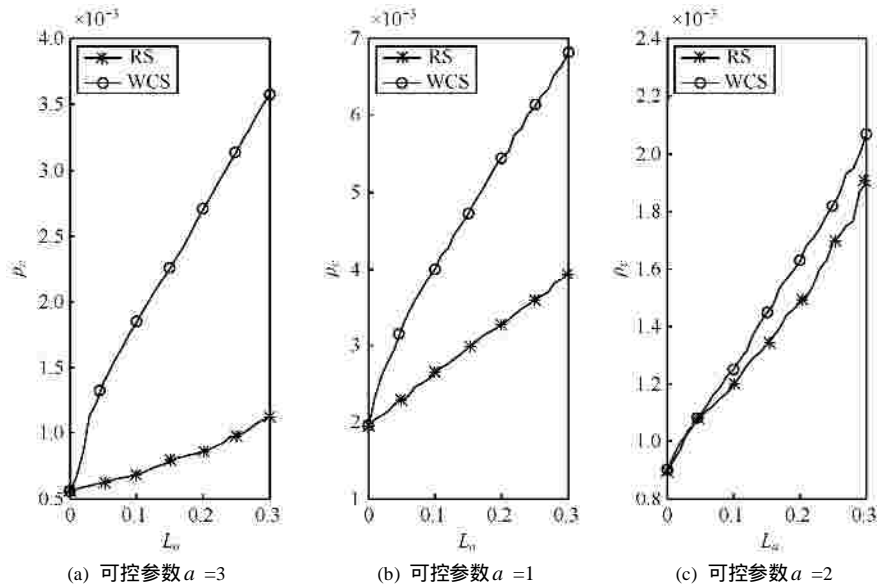


图 12 局部路由策略下不同 a 的 r_c 与 L_0 的关系

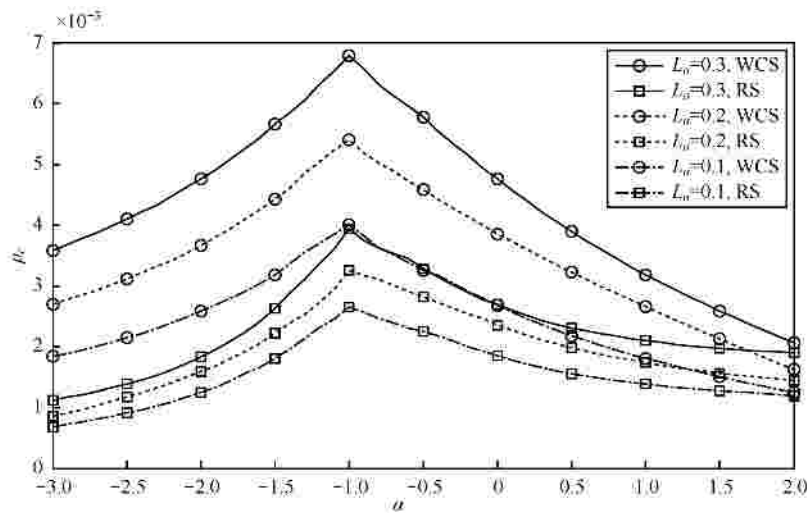


图 13 局部路由策略下不同的 L_0 (或 Q) 的 r_c 与 a 的关系

这 3 参数之间的详细变化关系如图 13 所示。从图 13 也可以得出，随着 a 值的不断增大，WCS 策略对 r_c 的改善能力逐渐减弱。但 r_c 最大值还是出现在 $a = -1$ 处，这与文献[26]结论相一致，即无标度网络在局部路由方式下，网络的最大负载能力出现在 $a = -1$ 。这是因为如果 a 为较大的正值，数据分组会全部涌向度较大的节点，向度小的节点转移的概率较低，导致中心节点出现堵塞。与此相反，如果 a 为较少的负值，数据分组会尽量选择度小的节点作为传输对象。在以上 2 种因素的影响下，在 a 取 -1 时，网络的负载能力最强。而 WCS 策略是在社团之间添加最能减弱社团性能的边，这些边一

般选择的节点的度相对较小。因此，当 a 较小时，与 RS 策略比较，WCS 策略的效果更好；当 a 较大时，WCS 策略对网络的负载能力的提升受限。

4.3 在实际 Internet 网络中的验证

本文采用实际 AS 层面 Internet 网络拓扑数据来验证 WCS 策略的有效性。所使用数据来自 CAIDA 的一个著名的主动探测项目 Skitter，所选数据集由 2006 年发布的 ITDK304^[27]。从 ITDK304 中提取拓扑数据，生成由 10966 个节点和 32 927 条边组成的图。首先采用 FN 算法将其划分为 26 个社团，模块度 Q 值为 0.531。在最短路径路由策略下，没有应用 WCS 策略之前， L_{AVG} 和 r_c 的值分别为 3.72 和

0.001 2。接着采用 WCS 策略，在社团之间添边 ($L_a=0.1$)， L_{AVG} 和 r_c 的值分别变为 2.79 和 0.003 4。在局部路由方式下，同样通过 WCS 策略在社团之间添边 ($L_a=0.1$)，观察了 a 分别设置为 -3、-1 和 2 这 3 种情况下的 r_c 的改善。在这 3 种情况下， r_c 值与原来相比，分别提升了 2.61、2.13 和 1.52 倍。结果表明 WCS 策略对实际 Internet 网络的性能改善同样效果显著。

5 结束语

本文提出了一种通过在社团之间增添有效捷径，减弱网络社团特性以提高网络性能的 WCS 策略。在伪随机网络、具有社团结构的无标度人工网络 and 实际 Internet 网络上分别基于全局最短路径路由和局部路由进行了实验。实验结果显示，在最短路径路由方式下，WCS 策略不仅可以提升全网的负载能力，而且能降低网络的平均最短路径，但改善的效果受网络的异构性和社团结构强弱的影响，网络异构性越强，改善效果越明显，网络的社团特性越明显，改善效果越显著。在局部路由方式下，WCS 策略能整体提升网络的负载能力，且当参数 a 小于 -1 时，这种提升能力更强。

在未来 Internet 网络中，WCS 策略将更加易于实现，因为对于采用波分复用(WDM)技术的光传输网络来说，通过配置实现不相邻的节点之间的光通路逻辑互连，无需额外增加设备和开支。因而，通过 WCS 策略，网络的性能可得到大幅度提升。

参考文献：

- [1] NEWMAN M E J. Detecting community structure in networks [J]. The European Physical Journal B, 2004, 38(2): 321-330.
- [2] BOCCALETTI S, LATORA V, MORENO Y, *et al.* Complex networks: structure and dynamics[J]. Physics Reports, 2006, 424(4-5): 175-308.
- [3] LUN L, DAVID A, WALTER W, *et al.* A first-principles approach to understanding the Internet's router-level topology [A]. Proceedings of the 2004 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications[C]. New York, 2004. 3-14.
- [4] ERIKSEN K A, SIMONSEN I, MASLOV S, *et al.* Modularity and extreme edges of the Internet [J]. Physical Review Letters, 2003, 90(14):1487011-1487014.
- [5] 李涛, 斐文江, 王少平. 无标度复杂网络负载传输优化策略[J]. 物理学报, 2009, 58(9): 5903-5910.
LI T, PEI W J, WANG S P. Optimal traffic routing strategy on scale-free complex networks[J]. ACTA Physica Sinica, 2009, 58(9): 5903-5910.
- [6] PU C L, ZHOU S Y, WANG K, *et al.* Efficient and robust routing on scale-free networks[J]. Physical A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2012, 391(3): 866-871.
- [7] DANON L, ARENAS A, DIAZ-GUILERA A. Impact of community structure on information transfer[J]. Physical Review E, 2008, 77(3): 0361031-0361036.
- [8] 邵斐, 蒋国平. 基于社团结构的负载传输优化策略[J]. 物理学报, 2011, 60(7): 0789021-0789027.
FEI S, JIANG G P. Optimal traffic routing strategy based on community structure [J]. ACTA Physica Sinica, 2011, 60(7): 0789021-0789027.
- [9] TOROCZKAI Z, BASSLER K E. Network dynamics: jamming is limited in scale-free systems[J]. Nature, 2004, 428(716): 716-716.
- [10] ARENAS A, DIAZ-GUILERA A, GUIMERA R. Communication in networks with hierarchical branching[J]. Physical Review Letters, 2001, 86(14):3196-3199.
- [11] ZHAO L, LAI Y C, PARK K, YE N. Onset of traffic congestion in complex networks[J]. Physical Review E, 2005, 71(2):0261251-0261258.
- [12] GUIMERA R, DIAZ-GUILERA A, VEGA-REDONDO F, *et al.* Optimal network topologies for local search with congestion[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(24):2487011-2487014.
- [13] LIU Z, HU M B, JIANG R, *et al.* Method to enhance traffic capacity for scale-free networks[J]. Physical Review E, 2007, 76(3): 0371011-0371014
- [14] WEI H, TOMMY W S C. An efficient strategy for enhancing traffic capacity by removing links in scale-free networks[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2010, 2010(1): 2-12.
- [15] BRZEZINSKI A, MODIANO E. Achieving 100% throughput in reconfigurable optical networks[J]. Networking, IEEE/ACM Transactions on, 2008, 16(4): 970-983.
- [16] GUIMERA R, ARENAS A, DIAZ-GUILERA A. Communication and optimal hierarchical networks[J]. Physical A: Statistical Mechanics and its Applications, 2001, 299(1-2): 247-252.
- [17] YIN C Y, WANG B H, WANG W X, *et al.* Efficient routing on a scale-free networks based on local information[J]. Physics Letters, 2006, 351(4/5): 220-224.
- [18] NEWMAN M E J, GIRVAN M. Finding and evaluating community structure in networks[J]. Physical Review E, 2004, 69(2): 0261131-02611315.
- [19] GUIMERA R, AMARAL L. Cartography of complex networks: modules and universal roles[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2005, 2005(2):1-13.
- [20] SANTO F. Community detection in graphs[J]. Physics Reports, 2010, 486(3/5):75-174.
- [21] NGUYEN N P, DINH T N, XUAN Y, *et al.* Adaptive algorithms for detecting community structure in dynamic social networks[A]. Proceedings of the IEEE INFOCOM[C]. Shanghai, China, 2011. 2282-2290.
- [22] 杨博, 刘大有等. 复杂网络聚类方法[J]. 软件学报, 2009, 20(1): 54-66.
Y B, LIU D Y, *et al.* Complex network clustering algorithms[J]. Journal of Software, 2009, 20(1):54-66.

formation Theory, 2007, 53(12):4655-4666.

[10] DONOHO D L, TSAIG Y, DRORI I, *et al.* Sparse Solution of Underdetermined Linear Equations by Stagewise Orthogonal Matching Pursuit[R]. Technique Report, 2006.

[11] NEEDELL D, TROPP J A. CoSaMP: iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples[J]. Communications of the ACM, 2010, 53(12):93-100.

[12] DO T T, GAN L, NGUYEN N S. Sparsity adaptive matching pursuit algorithm for practical compressed sensing[A]. Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers[C]. Pacific Grove, California, 2008.581-587.

[13] CHEN S S, DONOHO D L, SAUNDERS M A. Atomic decomposition by basis pursuit[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 1998, 20(1):33-61.

[14] BLUMENSATH T, DAVIES M E. Iterative thresholding for sparse approximation[J]. Fourier Anal, 2008, 14(5-6):629-654.

[15] GILBERT A, STRAUSS M, TROPP J, *et al.* Algorithmic linear dimension reduction in the l_1 norm for sparse vectors[EB/OL]. <http://www.math.ucdavis.edu/~vershynin/papers/algorithmic-dim-reduction.pdf>.

[16] GILBERT A C, STRAUSS M J, TROP J A, *et al.* One sketch for all: fast algorithms for compressed sensing[A]. Proceedings of the 39th Annual ACM Symposium on Theory of Computin[C]. New York, USA, 2007. 237-246.

[17] DAI W, MILENKOVIC O. Subspace pursuit for compressive sensing signal reconstruction[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2009, 55(5):2230-2249.

[18] 张宗念, 黄仁泰, 闫敬文. 压缩感知信号盲稀疏度重构算法[J]. 电子学报, 2011, 39(1):18-22.
ZHANG Z N, HUANG R T, YAN J W. A blind sparsity reconstruction algorithm for compressed sensing signal[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1):18-22.

[19] 刘亚新, 赵瑞珍, 胡绍海等. 用于压缩感知信号重建的正则化自适应

匹配追踪算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(11):2713-2717.
LIU Y X, ZHAO R Z, HU S H, *et al.* Regularized adaptive matching pursuit algorithm for signal reconstruction based on compressive sensing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 2(11):2713-2717.

[20] 杨成, 冯巍, 冯辉等. 一种压缩采样中的稀疏度自适应子空间追踪算法[J]. 电子学报, 2010, 38(8):1914-1917.
YANG C, FENG W, FENG H, *et al.* A sparsity adaptive subspace pursuit algorithm for compressive sampling[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(8):1914-1917.

[21] HUANG H, MAKUR A. Backtracking-based matching pursuit method for sparse signal reconstruction[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(7):391-394.

[22] CANDES E J. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing[J]. Comptes Rendus De l'Academie Des Sciences, 2008, Series I(346):589-592.

作者简介：



田文颢 (1987-), 男, 江西南昌人, 海军航空工程学院博士生, 主要研究方向为压缩感知、大气波导反演。

付争 (1986-), 男, 湖南湘潭人, 硕士, 92815 部队 68 分队工程师, 主要研究方向为通信信号处理、压缩感知。

芮国胜 (1968-), 男, 山东烟台人, 海军航空工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为小波及卡尔曼滤波理论。

(上接第 179 页)

[23] NEWMAN M E J. Fast algorithm for detecting community structure in networks[J]. Physical Review E, 2004, 69(6):0661331-0661335.

[24] HOLME P, KIM B J, YOON C N, *et al.* Attack vulnerability of complex networks[J]. Physical Review E, 2002, 65(5):0561091-05610914.

[25] XIE Z, LI X, WANG X F. A new community-based evolving network model[J]. Physical A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2007, 384(2):725-732.

[26] WANG W X, WANG B H, YIN C Y, *et al.* Traffic dynamics based on local routing protocol on a scale-free network[J]. Physical Review E, 2006, 73(2):0261111-0261117.

[27] PRIYA M, DMITRI K, MARINA F, *et al.* The Internet AS-level topology: three data sources and one definitive metric[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2006, 36(1):17-26.

作者简介：



蔡君 (1981-), 男, 湖南邵阳人, 中山大学博士生, 主要研究方向为复杂网络、网络优化。



余顺争 (1958-), 男, 江西南昌人, 博士, 中山大学教授、博士生导师, 主要研究方向为信息安全、信号处理、无线网络。