

无标度网络中基于能量的混合路由策略

杨先霞 濮存来 许忠奇 陈荣斌 吴洁鑫 李伦波

Energy-based hybrid routing strategy for scale-free networks

Yang Xian-Xia Pu Cun-Lai Xu Zhong-Qi Chen Rong-Bin Wu Jie-Xin Li Lun-Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 248901 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.248901

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.248901>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种有效的基于三角结构的复杂网络节点影响力度量模型

[An efficient node influence metric based on triangle in complex networks](#)

物理学报.2016, 65(16): 168901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.168901>

花簇分形无标度网络中节点影响力的区分度

[Discriminability of node influence in flower fractal scale-free networks](#)

物理学报.2015, 64(20): 208901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.208901>

复杂网络可控性研究现状综述

[Recent progress in controllability of complex network](#)

物理学报.2015, 64(18): 188901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.188901>

基于扩展度的复杂网络传播影响力评估算法

[Evaluating influential spreaders in complex networks by extension of degree](#)

物理学报.2015, 64(8): 088901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.088901>

面向结构洞的复杂网络关键节点排序

[Ranking key nodes in complex networks by considering structural holes](#)

物理学报.2015, 64(5): 058902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.058902>

无标度网络中基于能量的混合路由策略*

杨先霞 濮存来[†] 许忠奇 陈荣斌 吴洁鑫 李伦波

(南京理工大学计算机科学与工程学院, 南京 210094)

(2016年7月16日收到; 2016年8月21日收到修改稿)

针对节点能量受限的静态无标度网络, 提出了一种基于能量和最短路径相结合的路由策略. 该策略综合考虑邻居节点的能量水平和其到目的节点的最短路径长度, 利用控制参数 β 调节二者的权重. 仿真结果表明, 存在最佳的 β 值使得网络生存时间和数据包到达数达到最大值. 最后, 基于提出的路由策略研究了网络结构特征与网络生存时间之间的关系.

关键词: 无标度网络, 路由策略, 网络生存时间

PACS: 89.75.Hc, 89.75.-k, 89.20.Hh

DOI: 10.7498/aps.65.248901

1 引言

当前社会, 人们的工作和生活以及国家经济的发展都离不开互联网、物联网等通信基础设施及其依附行业. 不断增加的业务流量是对通信网络系统的稳定性和承载能力的考验. 如何构建高效、大容量、鲁棒的通信网络一直是学术界关心的热点问题^[1]. 近年来兴起的网络科学^[2]为通信网络的研究提供了新的理论工具. 首先, 各种通信网络本质上可以抽象成复杂网络, 研究表明互联网、email网络、社交网络等都具有小世界、无标度等特征^[3-6]; 其次, 通信网络数据传输过程可以建模成复杂网络传播的动力学过程. 事实上, 过去几年网络科学领域的研究人员利用复杂网络理论对通信网络传输过程进行了深入的研究, 主要讨论了复杂网络中的拥塞现象以及如何提高复杂网络的吞吐量^[7]. 研究发现, 复杂网络的吞吐量首先取决于复杂网络的拓扑结构. 无标度网络比均匀网络更容易出现网络拥塞现象^[8-10], 其主要原因是无标度网络度分布的不均匀导致网络负载分布的不均匀, 进而使得度大的节点容易出现拥塞. 然而现实世

界中大多数通信网络都是无标度网络^[6], 针对无标度网络的拥塞问题学术界提出了各种各样的优化策略, 大致分为两类: “硬”策略和“软”策略. “硬”策略通常指改进网络的拓扑结构, 从而减轻网络拥塞, 提高网络吞吐量. 例如, 高节点度优先删除策略 (high-degree-first, HDF)^[11]将边对应的两个节点的度乘积作为一种重要性度量, 然后删除少量重要性较大的边, 显著提高了网络吞吐量. 高节点介数优先删除策略 (high-betweenness-first, HBF)^[12]与HDF策略类似, 不同的是HBF策略用边对应的两个节点的介数乘积作为重要性度量. 另外, 有学者通过在最短路径较长的节点对之间加边以及在核心节点的邻居节点之间加边的方法来减轻拥塞和提高网络吞吐量^[13].

优化网络结构在实际应用中往往消耗较大或者可操作性较小. 因此, 以优化路由策略为主的“软”策略得到了更多的关注. 传统基于最短路径的路由策略选择网络中最短的路径作为转发数据的最佳路径, 在网络负载较轻时传输效率较高, 但在网络负载较重时很容易造成交通堵塞, 反而影响数据传输效率. 针对这一问题, 在很多改进的路由算法中不仅考虑了节点之间的路径长度, 还考虑了节

* 国家自然科学基金 (批准号: 61304154)、教育部博士点基金 (批准号: 20133219120032)、中国博士后基金 (批准号: 2013M541673) 和中国博士后特别资助 (批准号: 2015T80556) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: pucunlai@njjust.edu.cn

点度^[14-16]、节点权重^[17]、节点负载^[18-21]、等待延时时等^[22]多个因素,甚至进一步采用启发式的优化方法来减轻拥塞和提高数据吞吐量^[23].一般来说,利用更多的网络拓扑结构信息以及更高级的路由机制,数据转发性能会更好,但同时计算代价也更大.目前网络科学界更多地把目光投向了多层复杂网络的交通流问题,讨论如何优化网络结构和路由策略以提高多层复杂网络的吞吐量^[24-31].

然而,现实世界很多通信网络都是能量受限网络,如大规模无线传感器网络、卫星通信网络、移动通信网络、战场通信网络等^[32].这些大规模通信网络中很多甚至全部节点都是由有限寿命的电池来提供能量,一旦电池电量耗尽,节点就会失效,导致网络通信能力下降,甚至消亡.因此,对于能量受限的大规模复杂网络而言,更重要的问题是如何节约能量,延长网络的生存时间^[33-35].其中一个主要解决思路就是提出基于能量保护的路由协议,均衡网络节点能量,有效避免因网络中某些节点能量消耗过快而导致网络加速消亡^[33].本文基于复杂网络理论研究能量受限的无标度网络的生存时间,综合考虑邻居节点的能量水平和其到目的节点的最短路径长度这两个因素,通过路由参数控制二者的权重比例,提出了一种新型路由策略,有效地延长了网络的寿命.

2 网络传输模型

现实世界中大多数通信网络拓扑结构都具有无标度特性.因此,本文主要讨论无标度网络的数据传输以及网络生存时间问题.采用静态无标度网络模型(ST模型)^[36]生成无标度网络,步骤如下:

步骤1 将网络中的 N 个节点编号为 $i(i = 1, 2, \dots, N)$,节点 i 的权重设为 $\Omega_i = i^{-\alpha}(\alpha \in [0, 1])$;

步骤2 分别以概率(归一化权重) $\Omega_i / \sum_u \Omega_u$ 和 $\Omega_j / \sum_u \Omega_u$ 选择两个不同的节点 (i, j) , $\sum_u \Omega_u$ 是网络中已有节点的权重之和,若两节点之间不存在连边则添加连边,否则重新选择节点对进行连边,重复这个过程,直到网络中添加的连边数量达到 mN, m 为给定参数.

该模型生成的无标度网络节点平均度 $\langle k \rangle$ 为 $2m$,节点的度分布呈幂律分布形式,即 $P(k) \sim$

$k^{-\gamma}$,其中 $\gamma = (1 + \alpha)/\alpha$.由于 $\alpha \in [0, 1)$,所以 $2 < \gamma < \infty$.现实世界中大部分无标度网络对应的 γ 值在2到3之间,所以本文后面讨论的 γ 值范围为 $\gamma \in (2, 3]$.

进一步假设生成的无标度网络中所有节点具有相同的功能,即计算和选择最佳转发路径,以及生成、存储、转发和接收数据包.节点缓存队列长度设置成无限长,并且节点根据先进先出原则发送数据包.在每一时间步内,网络中节点以固定的数据包生成率 ρ 生成数据包,每个数据包随机选择源节点和目的节点(两者不同),并加入到源节点的队列中.节点每一步处理数据包的最大数量为有限的常数 C ,当节点队列中等待发送的数据包数量超过 C 时,部分数据包会滞留在节点队列中,等待后续发送.节点根据设定的路由策略转发数据包,数据包到达目的节点后被丢弃.此外,假设初始时刻网络中每个节点都有 E_0 个单位的初始能量,节点每转发一个数据包就会消耗一个单位的能量.本文受以往研究成果启发,假定网络的生命周期为从初始时刻到网络中刚刚出现能量耗尽的节点为止^[37].

3 路由策略

路由策略决定了数据转发的性能,为了延长网络的生存时间,路由策略需要保护能量较低的节点,而尽量让能量充足的节点多转发数据.但是,过度规避能量较低的节点会使得数据传输路径变长,网络整体耗能增加,从而使得网络生存时间减小.因此,在路由协议的设计中需要权衡考虑多个因素,本文综合考虑邻居节点的能量和邻居节点到目的节点的最短路径长度两个因素,提出了一种新的基于能量的混合路由策略.假设数据包当前所在节点为 s ,目的节点为 d ,如果 d 在 s 的邻居中,那么数据包被直接转发给 d ,如果 d 不在 s 的邻居节点中,那么数据包被转发给权重最大的邻居节点.邻居节点 v 的权重定义为

$$w_{sv} = \frac{\left(E_v / \sum_r E_r\right)^{(1-\beta)}}{\left(l_v / \sum_r l_r\right)^\beta}, \quad (1)$$

其中, E_v 和 l_v 分别表示邻居节点 v 的当前剩余能量和其到目的节点 d 的最短路径长度; $\sum_r E_r$ 表示

所有邻居节点的能量和; $\sum_r l_r$ 表示所有邻居节点到目的节点的最短路径长度之和; β 为自由参数, $\beta \in [0, 1]$, 其决定了归一化后的能量和路径长度在路由决策中的重要程度. 可以看出, 该混合路由策略是能量和路径长度的一种有效折中. 当 $\beta = 0$ 时, 选择能量最多的邻居节点作为下一跳中继节点, 不考虑传输路径长度. 当 $\beta = 1$ 时, 距离目的节点最近的邻居节点被选作下一跳中继节点, 不考虑节点的能量水平.

4 仿真结果与分析

在仿真实验中, 模拟网络数据传输过程, 测试提出的路由策略的有效性, 测量网络生存时间以及相关的数据转发性能, 讨论网络拓扑结构对数据传输过程的影响. 实验中测量的性能指标定义如下.

- 1) 网络生存时间 T : 从初始时刻到出现第一个能量耗尽的节点所用的时间.
- 2) 数据包到达数 Q : 在网络生命周期内成功到达目的节点的数据包总数.
- 3) 数据包到达率 η : 在网络生命周期内成功到

达目的节点的数据包所占比例:

$$\eta = \frac{Q}{\rho \times N \times T}. \tag{2}$$

- 4) 平均传播时间 τ : 数据包从源节点到达目的节点所用的平均时间, 定义为

$$\tau = \frac{\sum_{q=1}^Q t_q}{Q}, \tag{3}$$

其中 t_q 是指第 q 个数据包从源节点到达目的节点所用的时间 (含在节点队列中等待的时间).

仿真实验中参数说明如下: 网络节点数 $N = 1000$, 节点平均度 $\langle k \rangle = 6$, 无标度网络幂律指数 $\gamma = 3$, 节点初始能量 $E_0 = 1000$, 节点最大处理能力 $C = 10$, 数据包生成率 $\rho = 0.1$. 此外, 在研究网络结构的影响时, 每次只改变一个结构参数, 其他实验参数保持不变. 实验结果中的每一个数据点都是 100 次独立实验的平均值. 首先研究路由策略中控制参数 β 对传输性能指标的影响, 结果如图 1 所示. 从图 1(a) 可以看出, 网络生存时间 T 随着控制参数 β 的增大先增大后减小. 这是因为 β 等于 0 时, 路由策略仅考虑邻居节点的能量, 使

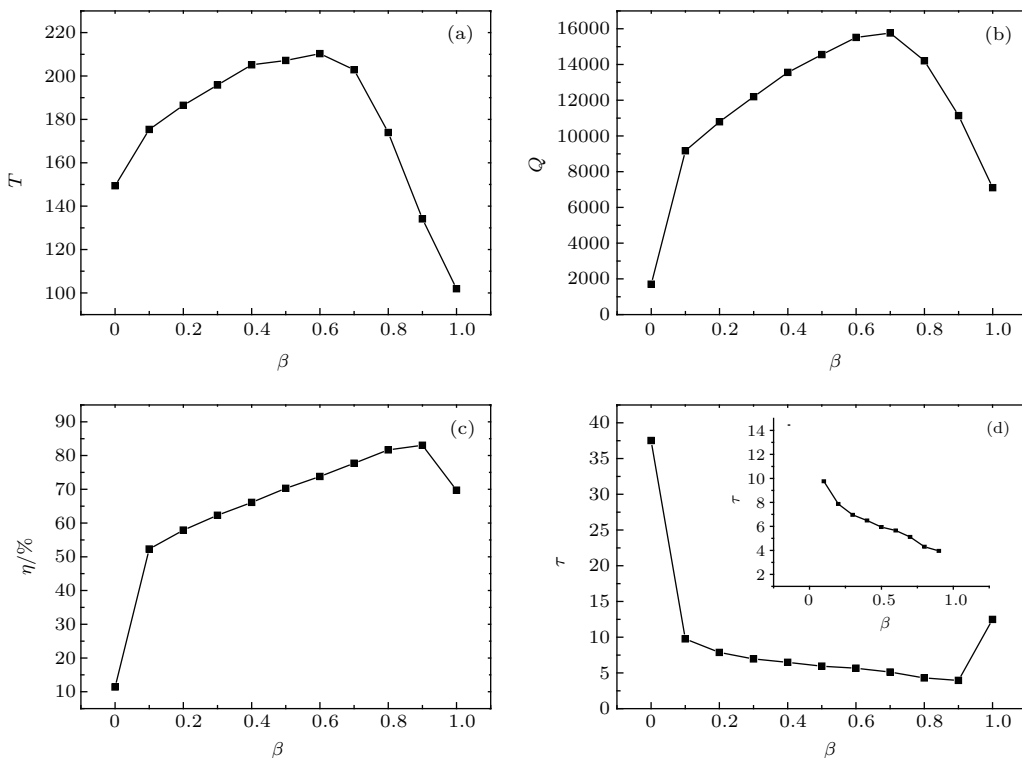


图 1 控制参数 β 与各个性能指标的关系 (a) 网络生存时间 T ; (b) 数据包到达数 Q ; (c) 数据包到达率 η ; (d) 平均传输时间 τ

Fig. 1. The relations between control parameter β and transmission performances: (a) Lifetime T ; (b) number of delivered packets Q ; (c) packet arrival rate η ; (d) average transmission time τ .

得数据传输的路径较长, 整体能量消耗较大, 网络生存时间较低. 随着 β 的增大, 路由策略开始并且越来越依赖于路径的长度, 节点能量的影响逐渐降低. 当 β 增大到0.6左右时, 路径长度和节点能量的影响实现了最佳折中, 此时网络生存时间最大. 当 β 继续增大时, 网络生存时间开始逐渐下降. 从图1(b)可以看出, 数据包到达数 Q 也是随控制参数 β 先增大后减小. 其原因可能是当 β 较小时, 为了避免能量较小的节点, 数据包沿着较长的路径迂回传输, 从而使得能够到达目的节点的数据包减少. 随着 β 的增大, 路由策略逐渐考虑路径长度, 使得到达目的节点的数据包数量逐渐增多并且达到最大值, 随后由于网络生存时间的不断减小, 数据包到达数也随之减小. 从图1(c)和图1(d)可以看出, 随着 β 的增大, 数据包越来越倾向于沿最短路径传输, 使得数据包到达率 η 不断增加, 平均传输时间 τ 不断减小, 只是在 $\beta > 0.9$ 时趋势发生变化. 这可能是因为节点的处理能力有限, 大量数据包滞留在最短路径中, 导致了到达率和平均传输时间性

能的下降.

接着, 我们讨论网络结构对网络最大生存时间的影响. 网络最大生存时间定义为: $T_{\max} = \max_{\beta} \{T\}$, 最佳参数 β_{opt} 为最大生存时间对应的 β 值. 首先讨论网络度分布的异质性对网络最大生存时间 T_{\max} 及其对应的最佳参数 β_{opt} 的影响. 由图2(a)可以看出, 无标度网络幂律指数 γ 越大, 网络最大生存时间 T_{\max} 越大. 这可能是因为幂律指数越大, 网络度分布越均匀, 数据传输的最短路径就不会过度依赖度大的节点, 使得节点能量消耗相对均衡, 从而能提升网络生存时间. 图2(b)表明, 最佳参数 β_{opt} 也随幂律指数 γ 有增大的趋势. 这说明当网络结构变均匀时, 路由策略需要更多地考虑路径长度因素, 以最大化网络生存时间.

进一步, 研究网络节点的平均度 $\langle k \rangle$ 对网络最大生存时间 T_{\max} 的影响. 由图3(a)可以看出, 网络最大生存时间 T_{\max} 随着平均度 $\langle k \rangle$ 的增大而增大. 这可能是因为当网络平均度增大时, 网络平均最短路径长度会变小, 数据包更快到达目的节点,

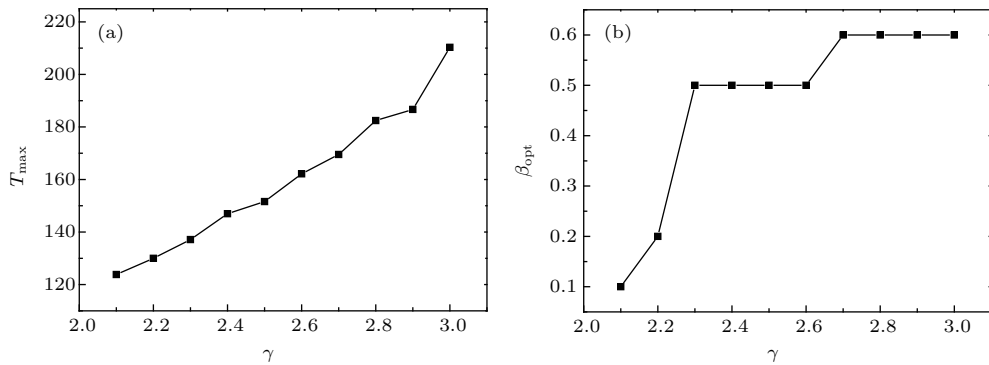


图2 (a) 网络最大生存时间 T_{\max} 及其 (b) 最佳参数 β_{opt} 与幂律指数 γ 的关系

Fig. 2. (a) Maximum lifetime T_{\max} and (b) optimal control parameter β_{opt} vs. power-law parameter γ .

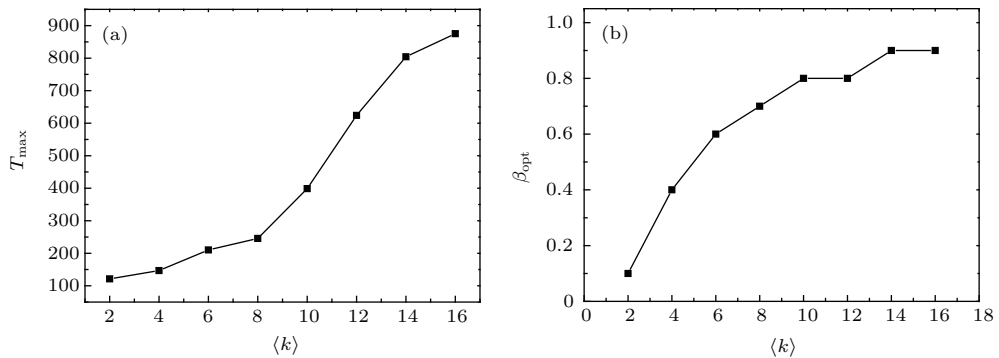
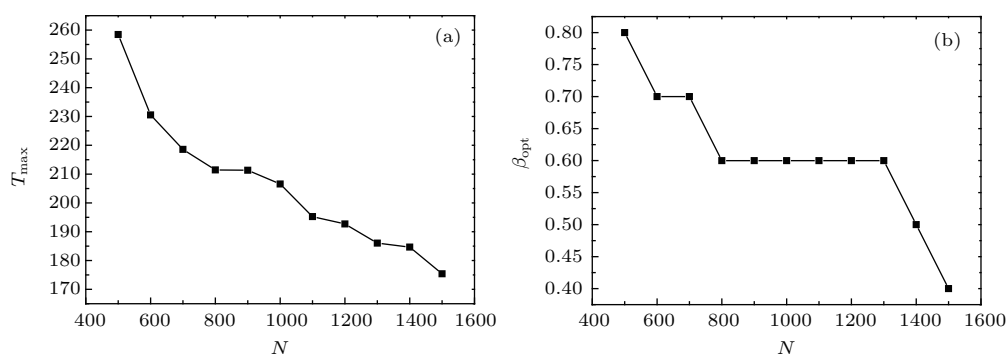


图3 (a) 网络最大生存时间 T_{\max} 及其 (b) 最佳参数 β_{opt} 与网络平均度 $\langle k \rangle$ 的关系

Fig. 3. (a) Maximum lifetime T_{\max} and (b) optimal control parameter β_{opt} vs. average node degree $\langle k \rangle$.

图4 (a) 网络最大生存时间 T_{\max} 和 (b) 最佳参数 β_{opt} 与网络节点规模 N 的关系Fig. 4. (a) Maximum lifetime T_{\max} and (b) optimal control parameter β_{opt} vs. network scale N .

从而使得数据传输的能耗降低,提高了网络的生存时间.由图3(b)可以看出,网络最佳参数 β_{opt} 也随平均度(k)的增大而增大.这意味着在网络平均路径长度变短的条件下,路由策略需要更多地考虑路径长度因素,以最大化网络生存时间.

最后,研究了其他条件不变的情况下,网络节点规模 N 对网络最大生存时间 T_{\max} 的影响.从图4(a)可以看出,随着节点规模的增大,网络最大生存时间几乎线性减小.这可能是由于所有节点以固定速率生成数据包,网络节点规模越大,网络中每步新增的数据包就越多,整体上数据传输耗能越快,使得网络生存时间减小.从图4(b)可以看出,最佳参数随网络节点规模的增大而有变小的趋势.这是因为其他条件不变的情况下,网络节点规模越大,对应的平均最短路径长度也越大.此时,为了缓解网络生存时间过快地变小,路由策略在选择最佳路径时需偏重考虑节点的能量水平因素.

5 结 论

对于能量受限的大规模复杂网络,网络的生存时间是最主要的性能指标之一.然而目前网络科学领域主要关注网络拥塞和网络吞吐量问题,网络生存时间没有得到足够重视,亟待进一步研究.

本文主要针对网络生存时间这一性能指标,面向无标度网络提出了一种基于节点能量的混合路由策略.该策略综合考虑了邻居节点的能量水平和其到目的节点的最短路径长度这两个因素,并通过控制参数权衡两者的相对比重,通过仿真实验求得网络最大生存时间及其对应的最佳参数.进一步研究了网络拓扑结构对网络生存时间的影响,发现无

标度网络异质性越小、平均度越大网络生存时间越大.值得一提的是,虽然本文主要讨论无标度通信网络,但在实验中我们发现提出的路由策略也能适用于相对均匀的网络.此外,本文中也简单讨论了数据包到达数、到达率、平均传输时间等性能指标.

参考文献

- [1] van Schewick B 2012 *Internet Architecture and Innovation* (Massachusetts: MIT Press) pp37–57
- [2] Barabási A L 2013 *Phil. Trans. R. Soc. A* **371** 20120375
- [3] Watts D J, Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 440
- [4] Barabási A L 1999 *Science* **286** 509
- [5] Wang X F, Chen G 2003 *IEEE Circuits Syst. Mag.* **3** 6
- [6] Wang X F, Li X, Chen G R 2012 *Network Science: An Introduction* (Beijing: Higher Education Press) pp3–26 (in Chinese) [汪小帆, 李翔, 陈关荣 2012 网络科学导论 (北京: 高等教育出版社) 第3—26页]
- [7] Chen S, Huang W, Cattani C, Altieri G 2012 *Math. Probl. Eng.* **2012** 732698
- [8] Arenas A, Díaz-Guilera A, Guimerà R 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3196
- [9] Guimerà R, Díaz-Guilera A, Vega-Redondo F, Cabrales A, Arenas A 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 248701
- [10] Zhao L, Lai Y C, Park K, Ye N 2005 *Phys. Rev. E* **71** 026125
- [11] Liu Z, Hu M B, Jiang R, Wang W X, Wu Q S 2007 *Phys. Rev. E* **76** 037101
- [12] Zhang G Q, Wang D, Li G J 2007 *Phys. Rev. E* **76** 017101
- [13] Huang W, Chow T W S 2010 *Chaos* **20** 033123
- [14] Yan G, Zhou T, Hu B, Fu Z Q, Wang B H 2006 *Phys. Rev. E* **73** 046108
- [15] Wu Z X, Peng G, Wong W M, Yeung K H 2008 *J. Stat. Mech.* **2008** 11002
- [16] Wang W X, Wang B H, Yin C Y, Xie Y B, Zhou T 2006 *Phys. Rev. E* **73** 026111
- [17] Pu C L, Pei W J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3841 (in Chinese) [濮存来, 裴文江 2010 物理学报 **59** 3841]

- [18] Yang H X, Tang M 2014 *Physica A* **402** 1
- [19] Wang D, Jing Y, Zhang S 2008 *Physica A* **387** 3001
- [20] Wang W X, Yin C Y, Yan G, Wang B H 2006 *Phys. Rev. E* **74** 016101
- [21] Ling X, Hu M B, Jiang R, Wu Q S 2010 *Phys. Rev. E* **81** 016113
- [22] Zhang H, Liu Z H, Tang M, Hui P M 2007 *Phys. Lett. A* **364** 177
- [23] Danila B, Yu Y, Marsh J A, Bassler K E 2006 *Phys. Rev. E* **74** 046106
- [24] Solé-Ribalta A, Gómez S, Arenas A 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 108701
- [25] Nian X, Fu H 2014 *Physica A* **410** 421
- [26] Pu C, Li S, Yang X, Yang J 2016 *Physica A* **447** 261
- [27] Zhou J, Yan G, Lai C H 2013 *Europhys. Lett.* **102** 28002
- [28] Zhuo Y, Peng Y, Liu C, Liu Y, Long K 2011 *Physica A* **390** 2401
- [29] Du W B, Zhou X L, Chen Z, Cai K Q, Cao X B 2014 *Chaos Soliton. Fract.* **68** 72
- [30] Tan F, Wu J, Xia Y, Chi K T 2014 *Phys. Rev. E* **89** 062813
- [31] Du W B, Zhou X L, Jusup M, Wang Z 2016 *Sci. Rep.* **6** 19059
- [32] Li G Y, Xu Z K, Xiong C, Yang C, Zhang S, Chen Y, Xu S G 2011 *IEEE Wireless Commun.* **18** 28
- [33] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H 2000 *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences* Manoa, USA, January 4–7, 2000, p10
- [34] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E 2002 *IEEE Commun. Mag.* **40** 102
- [35] Zhang D, Li G, Zheng K, Ming X C, Pan Z H 2014 *IEEE Trans. Ind. Inform.* **10** 766
- [36] Goh K I, Kahng B, Kim D 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 278701
- [37] Chen Y, Zhao Q 2005 *IEEE Commun. Lett.* **9** 976

Energy-based hybrid routing strategy for scale-free networks*

Yang Xian-Xia Pu Cun-Lai[†] Xu Zhong-Qi Chen Rong-Bin Wu Jie-Xin Li Lun-Bo

(School of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(Received 16 July 2016; revised manuscript received 21 August 2016)

Abstract

The infrastructures such as the internet networks, and phone networks, and their traffic capacity are well discussed in the field of network science. However, there is another type of communication infrastructure, such as the wireless sensor networks, which are usually deployed in tough environments to perform specific tasks. This kind of network usually has limited power supply, and thus the main issue is how to make good use of the energy and prolong the network lifetime. In this paper, we investigate the transport process in power-limited communication networks. We use the complex network models to generate the scale-free networks. We assign each node E_0 (a constant) unit of energy and an infinite queue with the first-in-first-out rule for buffering packets. In the traffic model, every node generates packets with a constant rate ρ . The packets' destination nodes are randomly chosen from the network. At each time step, every node delivers at most C packets. If a packet's destination node is among the neighbors of the current node, the packet will be delivered to the destination node directly and then be discarded from the destination node. Otherwise, the packet will be forwarded to a neighbor of the current node with a given routing strategy. In the delivery of a packet, the node consumes a fixed amount of energy, and will die out when it uses up its energy. We propose a hybrid routing strategy for the power-limited scale-free networks based on both the node energy and the shortest path. Specifically, in the routing strategy, we consider the residual energy of neighbor nodes and the shortest path lengths between the neighbor nodes and the destination, and utilize a free parameter β to adjust their relative importance. Simulation results demonstrate that there are optimal control parameters which correspond to the maximum network lifetime and the maximum number of delivered packets. According to the proposed routing strategy, we further study the relation between the network topological structure and network lifetime. We find that the more homogeneous the network, the larger the maximum network lifetime is. Moreover, we obtain that the maximum network lifetime gradually increases with the average node degree increasing, but almost decreases linearly with the network scale increasing. In this paper we discuss the network lifetime from the perspective of network science, and give more insights into the transport process on complex networks. In addition, our work provides some clues of how to design the efficient routing strategies for the power-limited communication networks.

Keywords: scale-free networks, routing strategies, network lifetime

PACS: 89.75.Hc, 89.75.-k, 89.20.Hh

DOI: 10.7498/aps.65.248901

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61304154), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20133219120032), the Postdoctoral Science Foundation of China (Grant No. 2013M541673), and the China Postdoctoral Science Special Foundation (Grant No. 2015T80556).

[†] Corresponding author. E-mail: pucunlai@njust.edu.cn