

面向成本-收益好的无标度耦合网络构建方法

金学广 寿国础 胡怡红 郭志刚

A toward cost-effective scale-free coupling network construction method

Jin Xue-Guang Shou Guo-Chu Hu Yi-Hong Guo Zhi-Gang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 098901 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.098901

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.098901>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用弛豫法探寻新的双开口膜泡

Exploring new opening-up membrane vesicles of two holes by using the relaxation method

物理学报.2016, 65(6): 068701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.068701>

荧光显微镜研究极端 pH 值诱导磷脂支撑膜的侧向再组织

Extreme pH-induced lateral reorganization of supported lipid bilayer by fluorescence microscope

物理学报.2014, 63(6): 068702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.068702>

带电多孔二氧化硅纳米颗粒在硫醇/磷脂混合双层膜上的非特异性吸附

Nonspecific adsorption of charged mesoporous nanoparticles on supported thiol/lipid hybrid bilayers

物理学报.2013, 62(17): 178701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.178701>

磷脂在膜结构间的交换: 温度和离子强度的影响

Lipid exchange between membranes: effects of temperature and ionic strength

物理学报.2013, 62(1): 018701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.018701>

面向成本-收益好的无标度耦合网络构建方法*

金学广† 寿国础 胡怡红 郭志刚

(北京邮电大学信息与通信工程学院, 网络体系构建与融合北京市重点实验室, 北京 100876)

(2016年1月6日收到; 2016年2月3日收到修改稿)

较大平均路径长度的网络会带来较大的网络延迟, 难以支持时间敏感业务与应用. 通过增加连接可以降低源和目的节点之间的跳数, 进而降低网络平均延迟, 使得更加快速地传播信息, 但是增加连接的同时也增加了网络构建成本. 分层网络是研究网络耦合的一个有效方法, 但目前网络构建过程中将每层网络分别处理并认为每层网络之间没有强相关性. 本文提出了一种面向成本-收益的无标度网络动态构建方法. 此方法将网络分为多层, 基于连续论在高层网络中添加连接, 使得网络演化为无标度网络. 此连续过程包括节点度增加过程和局部网络半径增长两个连续过程, 在增加连接的过程中引入表征网络构建成本和收益的成本-收益指标. 模拟结果表明引入成本-收益指标的无标度耦合网络构建方法能够在合理范围内有效降低网络平均路径长度, 提升网络性能, 并且本文给出了耦合网络的动态业务性能, 通过调整高层网络避免网络拥塞.

关键词: 网络构建, 无标度, 耦合网络, 成本-收益

PACS: 89.75.-k, 89.70.-a

DOI: 10.7498/aps.65.098901

1 引言

复杂网络被广泛应用于通信、交通、城市规划、疾病防控等领域, 网络的拓扑结构对网络整体性能非常重要, 因此优化网络结构是一项重要内容^[1]. 例如在交通网络中通过增加高速公路改善交通状况, 在接入网中通过增加远程连接^[2]提升网络性能.

不同的网络特征与网络构成方式密切相关, 经常用于AD HOC、传感器、车辆、MESH等多跳网络的随机图具有空间依赖性和接近连接特性, 这会导致长的平均路径长度, 不能很好地支持时间敏感业务. 而作为现实网络的一个重要特征的无标度网络特征与同等规模的随机网络相比, 其平均路径更小, 聚类系数更大. 平均路径长度越小, 网络间信息传播速度越快. 信息传播速度对于时间敏感业务非常重要^[3], 如财经信息, 实时通信等. 文献^[4—6]对小世界网络^[7]以及无标度网络^[8]的网络动态构

建方法和网络特征进行了研究.

在现有网络基础上修改连接可以提高网络性能, 通过修改连接可以改善网络拓扑^[9—12], 提升网络性能^[13]. 例如在无线接入网中, 网络节点均匀地与邻居节点相连, 数据需要较高的平均跳数也即平均路径长度 (APL) 到达目的节点, 通过增加光纤连接作为长程连接^[14]可以降低网络中一个节点到另一个节点的网络平均延迟, 改善网络延迟, 进而改善时间敏感业务服务质量^[15]. 文献^[16]利用无线连接管理功能在AD HOC网络中修改网络拓扑, 使之具有社会网络拓扑特征, 有效降低了平均路径长度, 进而增加信息传播速度并节约了网络资源. 然而以上研究集中在单独网络或分别处理每层网络, 并认为网络间无强耦合关系. 现实中网络层次之间有一定的耦合关系, 并且相互依存^[17], 网络之间的耦合关系将会影响网络性能以及网络收益^[18]. 例如无线接入、固定接入、光纤网络等混合网络的合作能够为用户提供更好的通信体验, 而隐含在这些网络交互的系统层面的行为被忽略了. 文

* 国家自然科学基金 (批准号: 61240040, 61471053) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xueguang.jin@bupt.edu.cn

献 [19,20] 对不同网络之间的耦合关系进行了研究; Morris 和 Barthelemy [21] 提出了一种揭示交通耦合网络关键特征的耦合空间网络模型. 但这些研究没有充分考虑实际网络构建情况以及耦合网络中的动态业务性能. 实际网络构建过程中, 如何降低成本并获得最大收益在连接增加过程中是重要衡量标准, 而成本-收益与增加连接的地理特征以及网络全局特征 (如平均路径长度) 密切相关.

针对以上问题并考虑到网络不同层次间的连接属性的差异性, 本文提出了一种动态的、连续的分层耦合网络构建方法. 该方法引入增加连接空间网络成本和网络整体收益关系的成本-收益指标, 并基于连续论过程使得网络演化为无标度网络. 结果表明, 在合理设定成本-收益指标的情况下, 能够有效降低平均路径长度, 提升网络性能. 本文还给出了动态业务性能.

2 无标度耦合网络构建方法

本文的主要目的是研究用于在耦合网络中构建具有无标度网络特征的构建机制. 社会网络、信息网络以及生物网络等都具有无标度特征, 网络中的节点间通过较短的路径连接, 并呈幂律分布 [22]. 本方法的目的是提升网络拓扑性能, 即缩短节点和节点间的平均跳数, 通过此方法在成本-收益要求下使得网络具备无标度特征, 从而改善时间敏感业务服务质量.

此方法首先依据连接属性的不同将网络划分为多层耦合网络, 通过“增长”和“偏好”连接在高层网络中添加连接进而使得整体网络演化为无标度网络, 并且增加的连接符合成本-收益指标要求, 文中考虑了两层网络. 该方法基于连续论进行网络构建, 包括两个连续过程, 在连续过程中新的节点依据偏好连接以一定的概率增加连接, 进而形成无标度网络.

网络表示为图 $G = (V^s, E^s)$, V^s 是节点, E^s 为节点间连接. 并且 $V^s = \{V_1^s, V_2^s, \dots, V_N^s\}$ 为节点集合, N 为节点数量, d_{ij} 为节点 i, j 间的欧矢距离 $U_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$, (x_i, y_i) 为节点 i 的坐标, (x_j, y_j) 为节点 j 的坐标. 网络根据连接属性划分为两层, 分别为低层网络 G_L 和高层网络 G_U . 高层网络的节点与低层的节点通过共址连接, 假设低层网络连接属性 $V_L = 1$, 高层连接属性为

$V_U = \alpha \times V_L, \alpha \geq 1$. 高层网络节点 N_U 从低层网络中选取, 从节点 i 到节点 j 的路径可能包括低层网络和高层网络, 如节点 E 和节点 G 之间的一条路径可以为 $E \rightarrow F \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow G$ (如图 1 所示).

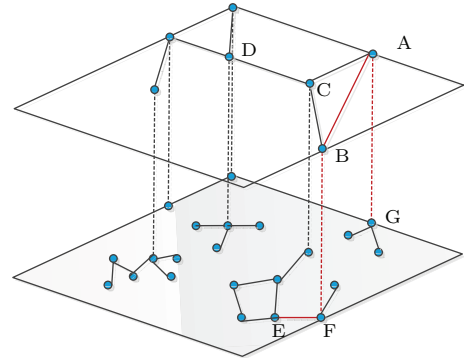


图 1 分层网络示意图, 高层网络节点从低层网络选取, 并且高层网络节点与低层网络节点共址
Fig. 1. An illustration of the layered networks. The nodes in the upper layer are selected from the lower layer. And these nodes have same location with their counterparts in the lower layer.

本文通过连续论方法来进行网络构建, 该方法以一定的速率选择新的节点并且增加的概率取决于节点的效用函数. 通过两个连续过程在高层网络中添加连接进而使得整体网络演化为无标度网络 [23], 连续过程包括节点度的增加过程和网络半径增长过程. 网络半径增长过程表示网络从局部到全局的变化过程, 局部网络由某一节点为中心的一定半径内的节点构成.

随着局部网络半径的增长, 增长过程中节点作为新加入的节点并且网络节点度平均增加速率为 m . 局部网络半径从初始化网络半径开始, 网络半径内的网络作为初始局部网络, 然后网络半径以步长为 b 的速率连续增加直至全局网络半径.

1) 节点度的增加过程

连接增加的概率与节点的度 k_i 有关, 并且以 m 的平均速率增加. 节点 i 与节点 j 之间增加的连接的成本收益 ζ_{ij} 需要符合成本-收益指标 β , 即 $\zeta_{ij} \leq \beta$.

设 k_i 的变化是连续的, k_i 增长过程符合节点度的优先连接规则, 进而演化为无标度网络, (1) 式表示 k_i 的增长过程.

$$\frac{dk_i}{dt} = m \cdot \Pi_{local} k_i, \quad \text{s.t. } \zeta_{ij} \leq \beta, \quad (1)$$

其中

$$\Pi_{\text{local}}k_i = \frac{k_i}{\sum_{j \in \text{local}} k_j}, \quad (2)$$

$\Pi_{\text{local}}k_i$ 为局部网络节点 i 度的权重.

2) 网络半径增长过程

假设局部网络半径增长是连续增长的, 增加过程中增加的节点被认为是新的节点, 局部网络半径由最小网络半径增长为全局网络半径. (3) 式为网络半径增长过程.

$$\frac{dR_{\text{local}}}{dt} = b, \quad b > 0, \quad 0 < R_{\text{local}} \leq R_{\text{global}}. \quad (3)$$

局部网络由某一节点为中心的一定半径内的节点构成, 即 $d_{ij} \leq R_{\text{local}}$, b 为半径变化率, R_{global} 为全局网络半径. $b > 0$ 并且上限为全局网络半径.

以网络任一节点为中心重复上述连续增长过程, 同时添加的连接满足 $\zeta_{ij} \leq \beta$, 此过程在高层网络中添加连接进而使得整体网络演化为无标度网络.

3 成本-收益指标

成本和收益是网络构建的主要指标, 表示连接建立过程中引起的成本和带来的网络收益, 成本包括连接建立所需的和地理位置相关的建设成本等, 收益包括连接增加所带来的整体网络性能改善, 因此成本-收益为是否增加连接的主要衡量标准. (4) 式表示了网络构建的成本-收益 ζ_{ij} . 成本包括节点 i 与节点 j 之间增加一条连接的成本, 收益包括网络平均路径长度收益以及增加连接本身带来的属性收益.

$$\begin{aligned} \zeta_{ij} = & w_1 \times \log \left(C_{ij} / \sum_{a_{ij}=1} C_{ij} \right) \\ & - \left(w_2 \times \log \left((L_{p-1} - L_p) / T_{\text{max}} \right) \right. \\ & \left. + w_3 \times \log \left(B_{ij} / \sum_{a_{ij}=1} B_{ij} \right) \right), \quad (4) \end{aligned}$$

其中 w_1 为成本权重, w_2 为网络平均路径长度收益权重, w_3 为连接属性收益权重. B_{ij} 为增加连接产生的属性收益, 如带宽收益.

(5) 式表示增加连接的成本, 设其与节点间欧氏距离 U_{ij} 成正比,

$$C_{ij} = w_c \times U_{ij}. \quad (5)$$

网络平均路径长度收益为 $(L_{p-1} - L_p) / T_{\text{max}}$, 其中 L_p 为增加连接后的网络平均路径长度, L_{p-1} 为增加连接前的网络平均路径长度, T_{max} 为初始网络平均路径长度. (6) 式给出了 L_p 的计算方法:

$$L_p = \frac{1}{\frac{1}{2}N(N+1)} \sum_{i \geq j} p_{ij}, \quad (6)$$

其中 p_{ij} 为节点 i, j 之间的最短路径长度.

当不考虑增加连接成本时, 网络将演化为全连通网络; 当不考虑增加连接带来的收益时, 为使网络连通, 网络将演化为最小遍历树.

4 模拟与分析

本节对文中带成本-收益的无标度耦合网络构建方法从网络拓扑和动态业务两部分进行模拟分析. 首先将异构混合通信网络根据连接属性的不同拆分为低层网络和高层网络, 模拟中低层网络为 N 个随机节点的无线多跳网络, 无线网络连接半径设为 1 km, 且节点间连接为双向连接, 网络带宽设为 1; 高层网络为与无线节点物理共址的宽带有线网络, 其网络带宽是无线网络带宽的 α 倍. 通过本文算法在高层网络中添加连接构建无尺度特征网络, 降低网络平均路径长度, 进而形成低时延网络. 模拟中低层网络由 N 个节点及其无线连接组成, 高层网络节点数为 0. 在网络构建过程模拟中设网络节点数 $N = 50$, 全局网络半径为 100, 即 $R_{\text{global}} = 100$ km, 局部网络半径初始为 10, 即 $R_{\text{local}} = 10$ km, R_{local} 增加步长为 10 km, 即 $b = 10$, 连接增加速率 $m = 3$. 高层网络连接建立的成本-收益和地理距离及网络特征密切相关, 因此模型中将成本和收益做归一化处理, 并且设增加连接的成本-收益指标需满足 $\zeta_{ij} \leq \beta = 0$. 在动态业务模拟中采用了 Arenas 等提出的业务模型 [24], 模拟中路由算法为最短路径算法.

$$\eta = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C}{R_T} \frac{\langle \Delta W \rangle}{\Delta t}, \quad (7)$$

其中 C 为节点传输能力; R_T 为业务产生速率, η 为拥塞特性; ΔW 为 t 时刻时网络中剩余的总业务量; $\Delta W = \langle W(t + \Delta t) - W(t) \rangle$, Δt 为窗口长度. 图 2 为分层耦合网络中的拥塞特性示意图, 由于高层网络具有高带宽、网络路径短等特性, 由此低层网络业务更倾向于选择高层连接, 因此产生业务汇

聚效应, 例如 E, F 周围节点优先选择 AC 连接, 因此造成 AC 连接拥塞.

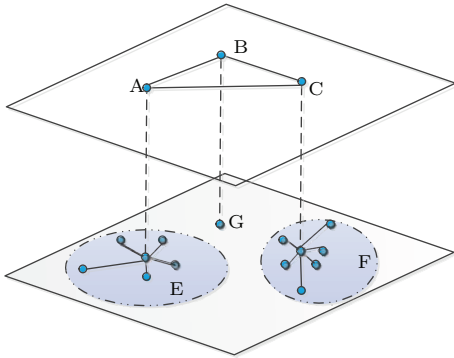


图 2 高层网络的汇聚效应示意图 E, F 周围节点都会选择 AC 连接, 因此可能会造成 AC 连接拥塞

Fig. 2. An illustration of aggregation effect of upper layer. Shortest routing strategy is introduced, nodes in E, F area will choose AC link, and therefore may lead AC link congestion.

图 3 给出了网络演化过程, 图 3(a) 为初始低层网络拓扑, 考虑到网络连通属性 (不连通时网络平均路径长度为无穷大), 网络首先演变为最小遍历树 (图 3(b)). 随着网络的演进, 共增加了 53 条连接, 在满足成本-收益的要求下使得网络平均路径长度下降 (图 3(c)). 从演化过程可以看出, 当 R_{local} 较小时增加连接较多, 随着 R_{local} 增加, 越来越少的连接被加入. 这是因为当网络平均路径长度较低时需要添加更多的连接来降低网络平均路径长度.

随着局部网络半径的增长, 即 R_{local} 以步长 b 增加, 新的连接被加入高层网络, 网络平均路径长度降低并增加网络集聚系数, 如图 4 所示. 网络平均路径长度因为在高层共址网络中添加长程连接而降低, 并且使得节点间的连通性增强, 每个节点的直接邻居节点增加, 因此网络集聚系数增加.

更高的成本-收益指标意味着可以允许以较大的成本增加网络收益, 图 5 显示随着 β 的增加网络平均路径长度下降, 即增加了更多的长程连接. 当网络平均路径较低时网络平均路径长度下降平缓, 这意味着当网络平均路径长度较低时降低网络平均路径长度需要花费更多成本. 图 6 显示网络演化过程中, 增加的连接严格满足成本-收益要求.

本文方法与无标度网络构建方法 [23] 进行了对比, 结果表明成本-收益指标能够更好地降低网络平均路径长度, 构建低时延网络, 这是因为传统无标度网络构建方法中添加的连接只与节点度相关,

没有考虑到添加的连接对整体网络平均路径长度的影响. 如图 7 所示, 本文方法相比于传统方法, 网络平均路径长度由 4.6 降低到了 3.5, 即平均网络时延降低了 23%; 在成本-收益对比上, 本文方法略优于无成本-收益指标限制的无标度构建方法.

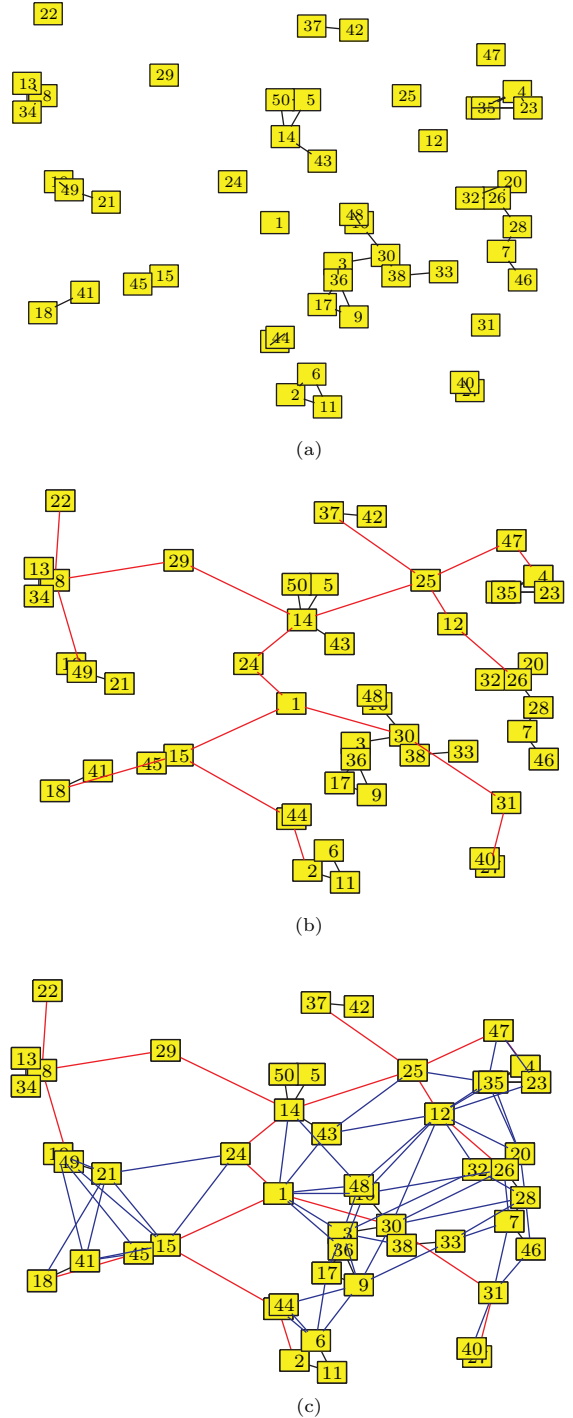


图 3 拓扑提升机制 (a) 初始拓扑; (b) 演变为最小生成树; (c) 无标度网络演进结果, 蓝线表示增加的连接

Fig. 3. Evolution of the topology modification mechanism: (a) The initial topology; (b) minimal spanning tree; (c) evolution result, blue line is the link added.

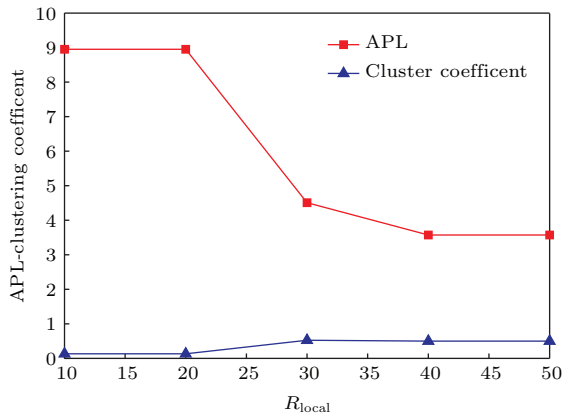


图4 拓扑构建过程 随着 R_{local} 的增加网络平均路径长度降低, 网络集聚系数增加

Fig. 4. Demonstration of topology modification mechanism. With R_{local} increasing, APL decreases rapidly and the clustering coefficient increases.

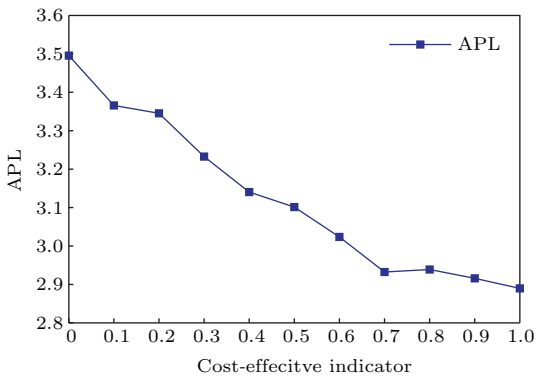


图5 网络特征与成本-收益指标 β 的关系 当网络平均路径长度较小时降低网络平均路径长度需要更多成本

Fig. 5. Demonstration of topology evolution vs cost-effective indicator β . It needs more cost to lower APL when APL is small.

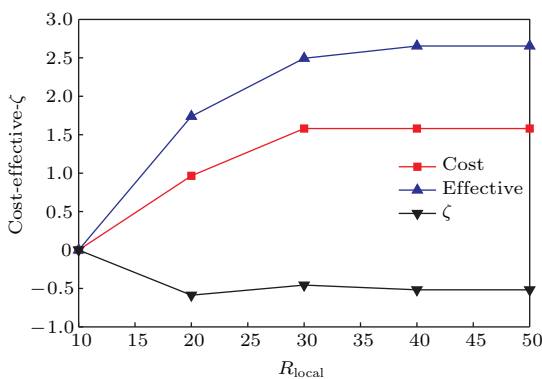


图6 成本-收益与 R_{local} 的关系

Fig. 6. Cost-effective vs R_{local} .

高层网络具有高带宽、网络路径短等特性, 因此低层网络业务更倾向于选择高层连接, 这样可以增加业务传输效率并减少开支. 由于汇聚效应, 更

多的业务涌向高层网络, 如果高层网络连接属性不能提供相应的业务传输能力则会引起高层网络拥塞, 此时可以通过增强高层网络连接属性(即增大 α)以降低网络拥塞率. 层间连接属性比值 α 越大, 即高层网络连接属性越强, 拥塞率越小, 图8给出了 α 和业务产生速率 R_T 之间的关系. 高层网络拥塞与网络业务需求也有一定的相关性, 业务需求越大越容易引起高层网络拥塞, 因此可以在成本-收益指标要求下满足整体网络性能的同时, 设定适当的高层网络连接属性即 α 值满足拥塞率要求.

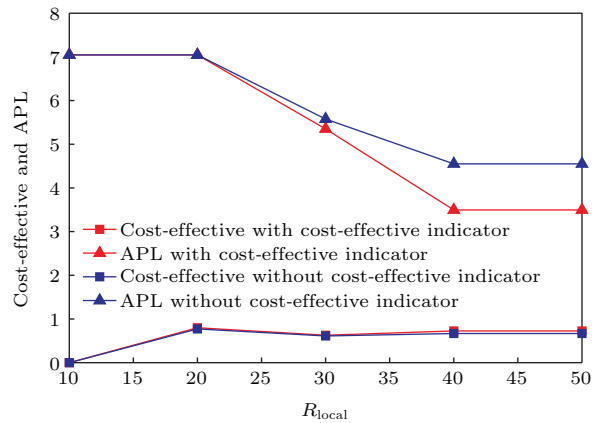


图7 (网刊彩色) 有无成本-收益指标网络构建方法对比

Fig. 7. (color online) Demonstration of topology evolution with cost-effective indicator vs without cost-effective indicator.

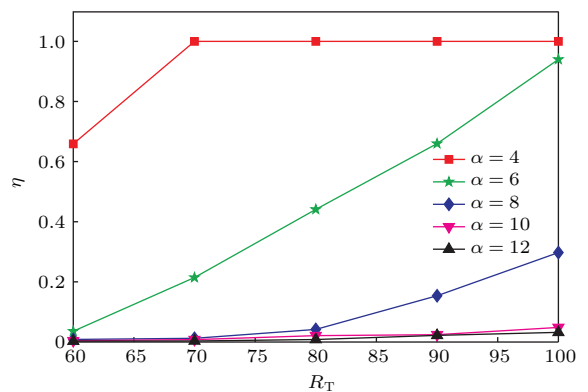


图8 (网刊彩色) 动态业务特性 随着 α 值增加, 拥塞率减少

Fig. 8. (color online) Dynamic traffic evaluation. The higher α value, the smaller the congested ratio.

5 结 论

本文提出了一种带成本-收益的无标度耦合网络构建方法. 此方法依据不同连接属性将网络分

层, 在高层网络中添加连接, 使得网络演化为无标度网络. 添加连接过程符合连续论, 包括节点度增加过程和局部网络半径增长两个连续过程, 添加的连接符合成本-收益要求. 仿真结果表明, 通过引入成本-收益指标的无标度耦合网络构建方法能够在合理范围内有效降低网络平均路径长度, 提升网络性能, 并且通过动态业务性能分析在分层网络中调节连接属性能够避免网络拥塞.

参考文献

- [1] Ling X, Hu M B, Long J C, Ding J X, Shi Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 018904
- [2] Douik A, Dahrouj H, Al-Naffouri T Y, Alouini M S 2015 *arXiv preprint arXiv: 1508.00140*
- [3] Saha S, Nandi S, Paul P S, Shah V K, Roy A, Das S K 2015 *Ad. Hoc. Network* **25** 406
- [4] Liu S X, Ji X S, Liu C X, Guo H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 158902 (in Chinese) [刘树新, 季新生, 刘彩霞, 郭虹 2014 物理学报 **63** 158902]
- [5] Guo J L, Zhu X Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 090207 (in Chinese) [郭进利, 祝昕昀 2014 物理学报 **63** 090207]
- [6] Wang Y, Yang X R 2015 *Chin. Phys. B* **24** 118902
- [7] Watts D J, Strogatz S H 1998 *Nature* **393** 440
- [8] Barabási A L, Albert R 1999 *Science* **286** 509
- [9] Liu Z, Hu M B, Jiang R, Wang W X, Wu Q S 2007 *Phys. Rev. E* **76** 037101
- [10] Zhang G Q, Wang D, Li G J 2007 *Phys. Rev. E* **76** 017101
- [11] Huang W, Chow T W 2010 *J. Stat. Mech.* **2010** 01016
- [12] Dai Q L, Shou G C, Hu Y H, Guo Z G 2013 *Proceedings of the 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)* Las Vegas, NV, USA, September 2-5, 2013 p1
- [13] Chen S, Huang W, Cattani C, Altieri G 2011 *Math. Probl. Eng.* **2012** 732698
- [14] Milgram S 1967 *Psychology Today* **1** 61
- [15] Fall K 2003 *Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications* Karlsruhe, Germany, August 25-29, 2003 p27
- [16] Santi P 2005 *CSUR* **37** 164
- [17] Yigitel M A, Incel O D, Ersoy C 2014 *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.* **2014** 1
- [18] Gerstel O, Filsfil C, Telkamp T, Gunkel M, Horneffer M, Lopez V, Mayoral A 2014 *IEEE Commun. Mag.* **52** 44
- [19] Tan F, Xia Y X, Zhang W P, Jin X Y 2013 *EPL* **102** 28009
- [20] Saumell-Mendiola A, Serrano M Á, Boguñá M 2012 *Phys. Rev. E* **86** 026106
- [21] Morris R G, Barthélemy M 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 28703
- [22] Newman M E J 2003 *SIAM Review* **45** 167
- [23] Barabási A L, Albert R, Jeong H 1999 *Physica A* **272** 173
- [24] Arenas A, Díaz-Guilera A, Guimera R 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3196

A toward cost-effective scale-free coupling network construction method*

Jin Xue-Guang[†] Shou Guo-Chu Hu Yi-Hong Guo Zhi-Gang

(Beijing Key Laboratory of Network System Architecture and Convergence, School of Information and Communication

Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

(Received 6 January 2016; revised manuscript received 3 February 2016)

Abstract

Large network average path length will cause large network delay which brings difficulty in supporting the time sensitive services and applications. Large hop distance between source node and destination node in traditional network leads to significant network delay. By adding long-ranged links, path length from source node to destiny node will be reduced and original network can be transformed into a scale-free network with a small network average path length. The network delay is optimized by minimizing hop distance, in which information can transfer more efficiently and rapidly. Adding links can lower network delay effectively, but on the other hand, it will increase its cost. Common network construction methods focus on separating networks that are very different from each other and mostly unaware of each other, such as fixed and mobile networks planning. But in many real networks, networks are dependent on each other; therefore ignoring these network interactions cannot become more efficient. Cost and effectiveness play a key role in real network construction and layering network is an effective way to analyze coupling network especially in heterogeneous network. In this paper, the model of a toward cost-effective scale-free coupling network construction method is proposed. It combines the advantages of layered network and cost-effective indicator. A layered coupling network model is established in which network is divided into several networks based on link property. Links in the same layer have the same property and the upper layer capability is higher than lower layer capability. The nodes in the upper network are selected from the lower layer network coupling with the corresponding nodes with the same spatial location. Based on the network optimization and evolving network researches, the increases of node degree and local network radius are supposed to be continuous, moreover cost-effective indicator is introduced which characterizes the costs and effectiveness of adding links. Based on continuum, links are added to upper layer network with a certain probability by two continuous processes and thus network evolves into a scale-free network. The two continuous processes include node degree increasing process and local network radius increasing process. In the previous processes, cost-effective indicator is introduced and only the links satisfied cost-effective are added. Cost-effective indicator characterizes the cost and effectiveness of network construction. Cost is proportional to Euclidean distance and effectiveness includes revenue of network average path length decreasing and link property benefit. In the coupling network, traffic prefers to transmit in the upper layer network for reducing network latency, and consequently leading to traffic congestion in upper layer. In the simulation, network topology evolution and dynamic traffic performance are evaluated. The simulation result shows that this method can effectively reduce the network latency within cost-effective requirement and initial network characteristics are maintained. The results also show that the network average path length declines slowly when network average path length is small because lower average path length needs higher cost when average path length is small. To investigate the traffic behaviors in the coupled layered networks, the traffic dynamic transition model is taken and dynamic traffic performance is given in this evolved scale-free network. Moreover, the cooperation between the two layers can be used to optimize network traffic performance by adjusting the link capacity to satisfy the requirements for the network congestion.

Keywords: network construction, scale-free, coupling network, cost-effective

PACS: 89.75.-k, 89.70.-a

DOI: 10.7498/aps.65.098901

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61240040, 61471053).

[†] Corresponding author. E-mail: xueguang.jin@bupt.edu.cn