

基于复杂性理论的军事通信网络中心化方法比较

熊金石¹, 李建华¹, 杨迎辉¹, 郭威武²

1. 空军工程大学电讯工程学院, 西安 710077

2. 93010 部队 89 分队, 沈阳 110016

摘要 复杂网络的中心化有助于发现复杂网络中的重要节点, 具有重要的应用价值。本文介绍了中心化指标的验证条件, 讨论了常用的度中心、偏心率中心、邻近中心、子图中心和信息中心 5 种中心化方法, 并以某一具体的军事通信网络为例进行了实例仿真应用。仿真结果显示, 不同方法下得到的网络中心节点不同, 反映出各种中心化方法侧重点的差异。分析表明, 在实际网络中单一方法不能准确反映网络的重要节点; 对于复杂网络的中心化问题, 应结合具体应用背景, 综合考虑几种中心化方法。

关键词 复杂网络; 军事通信网络; 中心化; 中心方法

中图分类号 N94, TN915.851

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.36.006

Comparison of Centrality Measures for Military Communication Network Based on Complexity Theory

XIONG Jinshi¹, LI Jianhua¹, YANG Yinghui¹, GUO Weiwu²

1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China

2. No. 89 Element, No. 93010 Troop of PLA, Shenyang 110016, China

Abstract Centralization of complex networks, which can help us find important nodes in complex networks, is of great practical value in many applications. Certification requirements of centrality index are introduced. Degree centrality, eccentricity centrality, closeness centrality, subgraph centrality and information centrality are discussed and their applicability is demonstrated on a certain military communication network. The simulation results show that the center node of network is different in different measures; it reflects differences in the emphasis of various centrality measures. Analysis shows that single measure can't reflect important nodes of networks exactly. As a result, several measures should be considered for the centralization analysis of complex networks based on specific application background.

Keywords complex networks; military communication network; centralization; centrality measure

0 引言

复杂网络的中心化问题不仅仅是发现网络图形的几何中心, 更为重要的是找到人们所关心的几个状态上表现特别的节点^[1]。军事通信网络日趋复杂, 对军事通信网络进行中心化使得人们能够在规模庞大、结构复杂的网络中准确而迅速地发现中心化节点, 寻找到网络的瓶颈, 进而控制网络的拥塞。

1 中心化指标的验证条件

中心化指标是用来对网络进行中心化的参数, 任何网络

中的任何节点均可定义中心化指标。合理定义的中心化指标应该满足下列条件^[2]:

- (1) 中心化指标应该是对称的, 即如果对网络的节点重新编号, 中心化指标应该不变;
- (2) 无论将一个节点看成整个图的节点, 还是将其看成一个连通分支的节点, 所得到的中心化指标的值应该一致;
- (3) 孤立节点的中心化指标应该最小;
- (4) 在具有链式结构(图 1(a))的网络中, 节点的中心化指标应该从边缘向中心递增, 即越靠近中心, 节点的中心化

收稿日期: 2011-07-22; 修回日期: 2011-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(61174162); 国家社会科学基金项目(10GJ376-067); 全军军事学研究生重点课题(2010JY0813-022)

作者简介: 熊金石, 博士研究生, 研究方向为通信网络控制, 电子信箱: stonedoc@126.com; 李建华(通信作者), 教授, 研究方向为网络规格与效能评估, 电子信箱: ljh@163.com

程度越高;

(5) 在所有具有 n 个节点的连通网络中,链式结构网络的顶端节点的中心化指标应该最小,而星型结构(图 1(b))网络的中心节点的中心化指标应该最大;

(6) 移去某个节点的某条边,至少不会增加该节点的中心化指标。

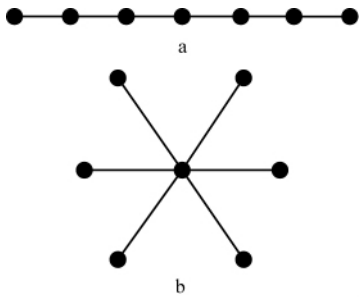


图 1 链式(a)、星型(b)结构简图
Fig. 1 Diagram of chain structure (a) and star structure (b)

2 中心化方法

指派给网络中每一个节点数值的函数称为一种中心方法。有许多不同的概念用来计算这种中心方法^[3]。这些方法的最初定义是在一个无向、无权重图 G 中, $G=(V, E)$, 假设 G 有 n 个顶点, m 条边, 用 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示 G 的顶点集合, $E=\{e_1, e_2, \dots, e_m\} \subseteq B \times V$ 表示边的集合。图 G 的邻接矩阵 $A=[a_{ij}]$, 其中:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{顶点 } i \text{ 与顶点 } j \text{ 有边相连} \\ 0 & \text{顶点 } i \text{ 与顶点 } j \text{ 无边相连} \end{cases} \quad (1)$$

为了方便,让邻接矩阵对角元素上的值 $a_{ij}=0$ 。

2.1 度中心方法

度中心方法(Degree Centrality, DC)基于这样一种思想:重要顶点是那些拥有与其他顶点有较多的连接边数的顶点。显然,一个图的顶点的重要性能依据他们度的大小进行排序。相应地,一个顶点 i 的度中心方法定义为^[4]

$$C_i^D = \frac{k_i}{N-1} = \frac{\sum_{i \in G} a_{ij}}{N-1} \quad (2)$$

其中, k_i 是顶点 i 的度。

2.2 偏心率中心方法

偏心率中心方法(Eccentricity Centrality, EC)的定义利用了顶点之间的距离。顶点 i 的中心性偏心定义为 $\max_{j \in V} \text{dist}(i, j)$, 那么这个顶点 i 的偏心率定义为^[5]

$$C^E(i) = \frac{1}{\max_{j \in V} \text{dist}(i, j)} \quad (3)$$

该方法保证了越位于网络中心的顶点越拥有较高的中心值,因此这类中心顶点是那些有着最小偏离值的顶点。

2.3 邻近中心方法

邻近中心方法(Closeness Centrality, CC)基于最小距离或

最短路径的概念,即顶点 i 的中心值是从 i 到其余顶点 j 经过边的最小数目。这种中心方法不仅应用了感兴趣顶点和所有其他顶点之间的最大距离,而且应用了这个顶点和所有其他顶点距离的总和。一个顶点 i 的邻近中心值定义为^[6]

$$C_i^C = (L_i)^{-1} = \frac{N-1}{\sum_{j \in G} d_{ij}} \quad (4)$$

其中 L_i 为顶点 i 到其他顶点的平均距离。

2.4 子图中心方法

子图中心方法(Subgraph Centrality, SC)的值描述了从一个顶点开始到这个顶点结束的闭环路的数目。一个闭环路代表网络中的一个子图,因此这个方法记录了一个顶点在这个网络中参加不同连通子图的次数。子图中心方法同网络的邻接矩阵的矩关联^[7], 即有

$$C_i^S = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(A^k)_{ii}}{k!} \quad (5)$$

其中, $(A^k)_i$ 为邻接矩阵 A 第 k 次幂后对角线上的第 i 个元素, 分母 $k!$ 确保式(5)收敛,越小的子图对这个和贡献越大。

2.5 信息中心方法

信息中心方法(Information Centrality, IC)被定义为通过从图中移除某个顶点及连接它的边后,引起该图效率 $E(G)$ 的相对衰退。一个顶点 i 的信息中心值被定义为^[8]

$$C_i^I = \frac{\Delta E_i}{E_i} = \frac{E_i(G) - E_i(G')}{E_i(G)} \quad (6)$$

其中,一个图 G 的效率被定义为

$$E(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}} \quad (7)$$

G' 为通过从原始图中移除顶点 i 及其连接的边后获得的拥有 $N-1$ 个顶点和 $K-k_i$ 边的图。

3 军事通信网络的图论表示

军事通信网络是以光缆通信,综合运用卫星通信、短波通信、微波通信、散射通信等多种通信手段,通过机固结合构成的基于 IP 体制的信息栅格网络,可以看作是各个通信实体通过信息的相互流通连接而形成的网络。对某军事通信网络中各通信实体依次编号,其拓扑结构(局部)如图 2 所示。

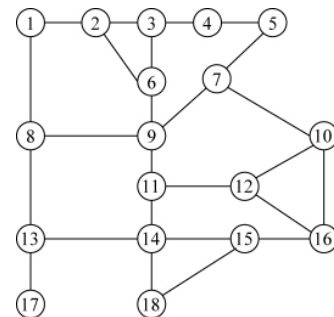


图 2 某军事通信网络的拓扑结构(局部)
Fig. 2 Topological structure of one military communication network (partial)

为了进一步研究网络的性质,用矩阵作为军事通信网络拓扑模型的逻辑结构。图 2 的矩阵形式为

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

4 应用与讨论

将式(8)分别代入式(2)一式(6)可求得图 2 所示军事通信网络各通信节点在各中心方法下的中心值,具体数据如表 1 所示。

为了更直观地表现 5 种中心方法下网络中心化的差异,编程绘图表示其中心值,如图 3 所示。

从图 3 可以很明显看出,5 种方法中有 4 种方法表示 9 号节点的中心化程度最高,即 9 号节点为该军事通信网络的中心节点,即最重要节点。这一点从网络的拓扑图中也可以得到印证。所以,要加强对 9 号节点的监管和保护,保证网络的正常运转。

从图 3(a)中可以看到,度中心方法基本上可以刻画节点在网络中的中心化程度,唯一的不足是,没有反映出接近中心的节点的中心化程度高于其余节点。事实上,度指标不满足关于中心化指标的条件(4)。

从图 3(d)中可以看到,通过子图中心方法得到的中心节点是 14 号节点,而不是 9 号节点。由其定义可知,子图中心方法记录了一个节点在这个网络中参加不同连通子图的次数。子图中心方法可以确定信息负载繁重的网络节点,而在几何位置上处于中心地位的节点不一定可以通过子图中心方法加以确定。这印证了网络中最重要的节点往往不是网络的几何中心。

不同方法下得到的网络中心节点的不同,反映出各种中心化方法侧重点的差异。如偏心率中心法和邻近中心法,由其定义可知,越接近网络拓扑几何中心的节点,其中心值越大,这从图 3(b)、3(c)中得到体现,图形出现明显单峰。若考虑网络容量,这两种方法相对更加合适。图 3(e)中,13 号节点的中心值仅次于 9 号节点,分析可知,其原因在于经过该点的路由距离更短。所以,当考虑信息流速时,应优先考虑信息

表 1 5 种中心方法下各节点的中心值(降序排列)

Table 1 Center values for each node with five kinds of centrality measures (descending order)

节点	DC	节点	EC	节点	CC	节点	SC	节点	IC
9	0.2353	9	0.3333	9	0.4857	14	3.7854	9	0.2007
14	0.2353	6	0.2500	11	0.4474	9	3.3599	13	0.1904
2	0.1765	7	0.2500	7	0.4146	6	2.8689	14	0.1710
3	0.1765	8	0.2500	8	0.4146	12	2.8415	7	0.1570
6	0.1765	11	0.2500	14	0.3953	16	2.8375	8	0.1543
7	0.1765	12	0.2500	6	0.3864	15	2.8374	11	0.1508
8	0.1765	2	0.2000	13	0.3778	10	2.8117	6	0.1319
10	0.1765	3	0.2000	12	0.3696	2	2.7444	10	0.1264
11	0.1765	5	0.2000	10	0.3617	3	2.7243	15	0.1194
12	0.1765	10	0.2000	15	0.3400	11	2.5144	16	0.1187
13	0.1765	13	0.2000	16	0.3333	7	2.3184	12	0.1185
15	0.1765	14	0.2000	1	0.3269	8	2.3148	3	0.1158
16	0.1765	15	0.2000	2	0.3269	13	2.2546	2	0.1146
1	0.1176	16	0.2000	5	0.3269	18	1.9585	5	0.1070
4	0.1176	1	0.1667	3	0.3148	1	1.4446	1	0.1065
5	0.1176	4	0.1667	18	0.3036	4	1.3647	4	0.0972
18	0.1176	17	0.1667	4	0.2833	5	1.3463	18	0.0960
17	0.0588	18	0.1667	17	0.2787	17	0.6475	17	0.0816

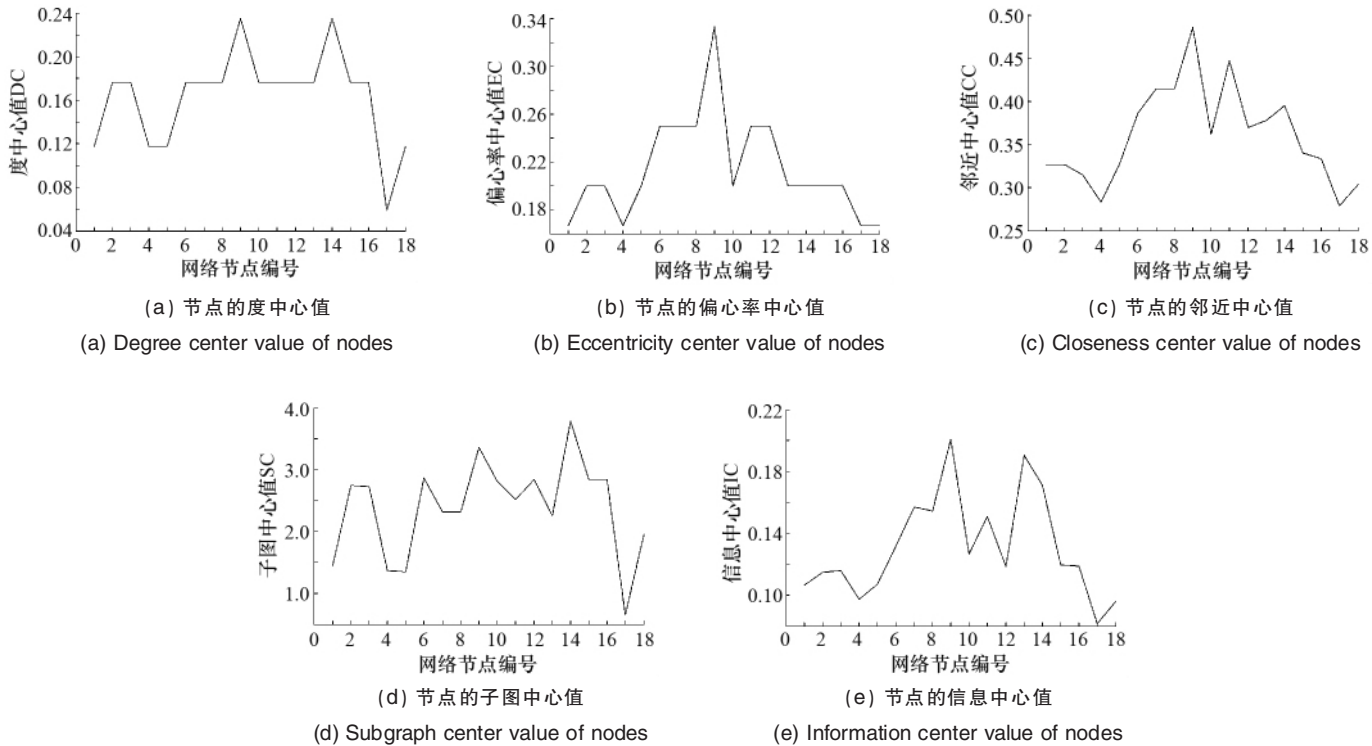


图3 5种中心方法下各节点的中心值分布

Fig. 3 Center value distribution for each node with five kinds of centrality measures

中心方法。

5 结论与展望

军事通信网络的中心化具有重要的理论价值及应用价值。本文分析并比较了多种常用的中心化方法,说明军事通信网络的中心化与具体应用背景紧密关联,强调复杂网络的中心化实际上是寻找与具体应用相关的重要节点,即实际上不存在普遍意义的重要节点,复杂网络的中心化只是处理复杂问题的一种方法。另外,本文对常用的中心化方法在具体网络中的应用进行了讨论,这对于合理选取中心化方法具有一定的指导意义。下一步将结合具体应用背景,研究多种方法的联合运用问题,并基于复杂网络的传播动力学理论,探索研究复杂动态网络的中心化问题。

参考文献 (References)

[1] 王林, 张婧婧. 复杂网络的中心化[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2006, 3(1): 13-20.

Wang Lin, Zhang Jingjing. *Complex Systems and Complexity Science*, 2006, 3(1): 13-20.

[2] Gomez D, Gonzalez-Aranguena E, Manuel C. Centrality and power in social network: A game theoretic approach [J]. *Mathematical Social Sciences*, 2003, 46(1): 27-54.

[3] 付立东. 中心方法在复杂网络中的比较 [J]. 西安科技大学学报, 2010, 30(1): 107-111.

Fu Lidong. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2010, 30(1): 107-111.

[4] Wasserman S, Faust K. *Social networks analysis: Methods and applications*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

[5] Hage P, Harary F. Eccentricity and centrality in networks [J]. *Social Networks*, 1995, 17(1): 57-63.

[6] Scott J. *Social network analysis: A handbook* [M]. 2nd ed. London: Sage Publications, 2000.

[7] Estrada E, Rodríguez-Velázquez J A. Subgraph centrality in complex networks[J]. *Phys Rev E*, 2005, 71(55): 56-103.

[8] Latora V, Marchiori M. A measure of centrality based on networks efficiency [J]. *New J Phys*, 2007, 9(6): 188.

(责任编辑 马宇红,代丽)



《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。