

基于复杂网络理论的无线传感器网络特征度量分析

张成才 齐小刚

(西安电子科技大学数学科学系 西安 710071)

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室 西安 710071)

摘要 通过研究复杂网络的理论,介绍了复杂网络的几种主要特征度量,并以此分析了无线传感器网络的特性。列举了无线传感器网络的节点度分布、集聚系数、平均路径长度、网络联通性等特性。研究了节点数、通讯半径、连通率之间的关系,由仿真的数据得出,增加节点不能完全保证网络的联通,只能增加联通的概率,而增加通讯半径则可以迅速地使网络联通。因此,在条件允许的情况下,选择通讯半径大的传感器比增加撒布节点更能保证网络的联通。最后给出了适合于无线传感器网络的介数的评价方法。

关键词 节点度分布,集聚系数,平均路径长度,网络联通性,介数

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Analysis of Wireless Sensor Network Characteristics Measurement Based on Complex Network Theory

ZHANG Cheng-cai QI Xiao-gang

(Department of Applied Mathematics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract By studying the complex network theory, this paper introduced the main features of a complex network of several metrics, and analyzed the characteristics of wireless sensor networks. A wireless sensor networks degree distribution, clustering coefficient, characteristic path length, network connectivity and other features were listed. This paper studied the relationship between the number of nodes, communication radius and the rate of connectivity. The data obtained from the simulation shows, increasing the node cannot fully guarantee connectivity of the network, but can only increase the probability of connecting, increasing emission radius can quickly make the network connect. Therefore, if the conditions allow, to select sensors of a larger emission radius is better than to layout more sensors. Finally, the article described a method which is suitable for wireless sensor networks to assess betweenness.

Keywords Degree distribution, Clustering coefficient, Characteristic path length, Network connectivity, Betweenness

20 世纪 60 年代,著名数学家 Erdos 和 Renyi 提出 ER 随机图模型,开始了复杂网络的理论研究。大多数实际的复杂网络具有如下几个基本特征:行为的统计性、节点动力学行为的复杂性、连接的稀疏性及结构的复杂性、时空演化复杂性等。系统结构、功能和动力学之间有紧密的联系。无线传感器网络也具有相似的特性。国内外有不少文献就网络拓扑结构的各种测度进行了论述,主要有节点度分布、集聚系数、平均路径长度、介数、节点抗毁测度等等,网络抗毁性和节点重要性,在通信网的可靠性分析和设计中具有重要意义^[1-4]。节点重要性的评价方法主要有基于生成树的方法等。

研究发现,上述方法不具有普用性,对于有些测度,无线传感器网络表现符合,而对于另一些测度,无线传感器网络表现了新的特性。例如,由于无线传感器网络的节点密集,基于最短路的节点重要性评价和网络整体性能评价将得到不准确的评价结果。

1 复杂网络简介

复杂系统广泛存在于自然、社会、生物、工程技术等众多领域,现实世界中存在的大量复杂系统,都可以用网络来描述,如交通网、通信网、合作网等,复杂网络即是大量真实复杂系统的抽象,它能够描述复杂系统内部的各种相互作用和关系。

1.1 复杂网络理论的提出与发展

1736 年,瑞士著名数学家欧拉为解决东普鲁士城镇的哥尼斯堡七桥问题,首先提出了图论的方法,即所谓著名的“欧拉图问题”;接着对复杂网络理论做出杰出贡献的是匈牙利著名的数学家 Erdos 和 Renyi,他们在 20 世纪 50 年代末和 60 年代之间建立了著名的随机图理论^[6];1998 年,复杂网络又有了一次突破性进展,Watts 及其导师 Strogatz 构造了具有较高的集聚系数和较小的平均最短距离的网络,提出了小世

到稿日期:2009-12-11 返修日期:2010-03-16 本文受国家自然科学基金(No. 60703118, 60974082),西安电子科技大学基本科研业务费项目(No. JY10000970013),陕西省自然科学基金(No. 2007A01),ISN 国家重点实验室专项基金(No. ISN02080003)资助。

张成才(1986-),男,硕士生,主要研究方向为复杂网络、无线传感器网络,E-mail:xdchengcai@163.com;齐小刚(1973-),男,博士,副教授,硕士生导师,CCF 会员,主要研究方向为图论与组合最优化、网络优化理论与方法。

界网络模型^[7],揭示了复杂网络的小世界效应;1999年美国Barabasi及Albert提出了一个无标度网络模型^[8],发现了复杂网络的无标度性质,引起了全世界的重视,推动了复杂网络研究的发展。图1为随机图和无标度网络的节点度分布。

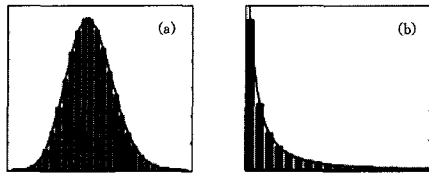


图1 泊松分布(a)和幂率分布(b)

1.2 复杂网络的研究进展

复杂网络主要研究网络的几何性质、网络的形成机制、网络拓扑的统计规律、网络演化的动力学机制等。在自然科学领域中,其研究的主要度量特征包括:节点度及其分布特征、节点度的相关性、集聚程度、平均路径长度、网络联通性及介数等。

通过研究复杂网络的各个度量特征,已经发现复杂网络的多种性质,包括小世界性、无标度性、高聚类性等。

2 无线传感器网络的主要特征度量

2.1 无线传感器网络度分布

可以将无线传感器网络看成一个图,图中的节点就是传感器个体,节点个体之间的关系由边表示。节点之间的连通特性由边权表示,在本文中只考虑能量而不考虑链路特性。设 $G=(V,E)$ 为一个复杂网络所对应的图, V 是所有节点的集合, E 是所有边的集合,节点的度是指连接到该节点的边数。

引入复杂网络中度分布的定义,定义度分布 $P_d(k)$ 为:

$$P_d(k) = \frac{\text{度等于 } k \text{ 的节点数}}{\text{节点总数}} \quad (V \text{ 正整数 } k) \quad (1)$$

设节点总数为 N ,边总数为 W ,则由于每个节点的度最少为0、最多为 $N-1$,易知度分布存在下列关系:

$$\sum_{k=0}^{N-1} P_d(k) = 1 \quad (\text{完备性}) \quad (2)$$

基于无线传感器网络实际应用情况,对网络做出如下假设前提:1)网络中传感器节点为随机撒点的情况;2)节点发射功率一定,感知半径一定,假设给定了能量有效距离(能量有效距离作为门限值);3)传感器节点一旦撒完则坐标已知,且节点都是平等的,都有发送、感知、转发数据的功能,都可以成为簇头节点进行数据融合;4)忽略无线信道竞争和广播时延,即假定任意节点发送的信息几乎在同一时刻被其邻居节点接收。

在随机撒点的情况下,给定节点个数和网络的宽度,若两节点之间距离不大于能量有效距离,则视为联通,否则视为不联通。在节点能量有效半径为50,网络宽度为 600×600 的条件下,随机撒布节点,节点的度的分布为仿真1000后求得的均值,如图2所示。仿真环境为visual studio 2005以及matlab7.0。

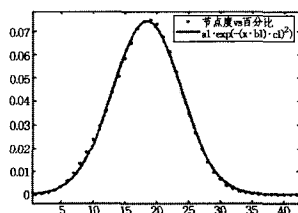


图2 节点度的分布(450个节点)

现今研究人员获得了许多大型实际网络的数据并对其进行了一系列统计分析。统计结果表明,在随机网络中度分布服从Poisson分布^[6],而在大量实际存在的网络中度分布服从幂律分布,具有无标度特性。

由以上仿真可以知道,无线传感器网络的度分布不服从幂律分布,由matlab拟合显示,无线传感器网络的度分布大致服从正态分布。

2.2 无线传感器网络聚类系数

聚类系数又称作簇系数,节点 V_i 的簇系数 C_i 描述的是网络中与 V_i 直接相连的节点之间的连接关系,即与该节点直接相邻的节点间实际存在的边数目与最大可能存在的边数之比。表达式为 $C_i = 2e_i / (k_i(k_i - 1))$, k_i 为节点 V_i 的度, e_i 为与 V_i 直接相连的节点之间实际存在的边数。

如果用 $C(k)$ 表示所有度为 k 的节点的簇系数平均值,则 $C(k)$ 与 k 之间的关系称为簇度相关性。假设仿真的条件不变,则可以研究平均簇系数与节点度之间的关系,求得仿真结果,如图3所示。

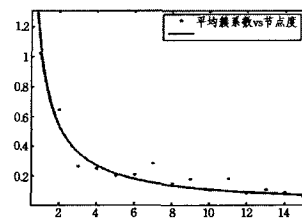


图3 平均簇系数与节点度的关系(350个节点)

以上仿真结果表明,在无线传感器网络中,节点间的平均簇系数 $C(k)$ 与节点度 k 之间存在倒数关系: $C(k) \sim k^{-1}$,无线传感器网络具有的这种关系,称作为层次性,因此无线传感器网络是层次网络^[9]。 C 称为无线传感器网络的集聚系数, C 为全部节点的簇系数的算术平均值,计算公式为(N 为节点数目):

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N C_i$$

2.3 平均路径长度

平均路径长度是指网络中的所有节点对之间的最短距离的平均值,最短距离是指某一节点到另一节点的最少边的数目, d_{ij} 为节点 V_i 和节点 V_j 之间的最短距离。在复杂网络中, d_{ij} 中的最大值称作网络的直径。平均路径长度记为:

$$APL = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in V} d_{ij}$$

固定网络宽度(600×600)和节点数(300),经仿真得出,在无线传感器网络中,平均路径长度与网络中的有效节点数有以下关系,仿真结果如图4所示。

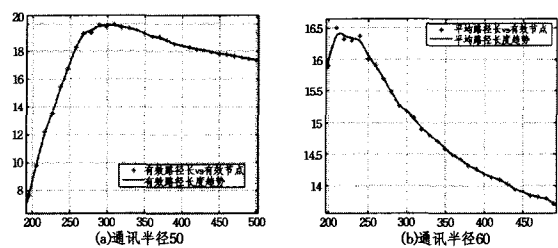


图4 有效节点数与 APL 的关系

有效节点指在网络中非孤立的节点,在本文中 APL 的公式中的 N 即是非孤立节点,由于在仿真中网络宽度、节点数、

通讯半径都是相对值,通讯半径变化也相当于一定比值的节点数或网络宽度变化,因此,由上图可以得出结论,无线传感器网络中,通讯半径由小变大(节点由少到多的撒布)的过程,会使得网络的平均路径长度先增大后减小,由2.4节可以知道,APL先增大,实际是网络联通子图变多、变大的过程;APL后减小,实际是联通子图聚合的过程,最后将会聚合为联通的网络(仅仅具有极少数的孤立节点)。

2.4 网络联通性

无线传感器网络中,由于各种原因,如节点撒布时造成的邻居节点之间的距离超出了感知半径,或随着时间的增加节点消耗完能量而死亡,都会造成无线传感器网络的分割,形成不同的子网。通过固定无线传感器网络模型的区域宽度(600 * 600),分别研究节点数与联通分支个数的关系以及节点数一定时节点感知半径与联通分支数的关系。仿真结果如图5所示。

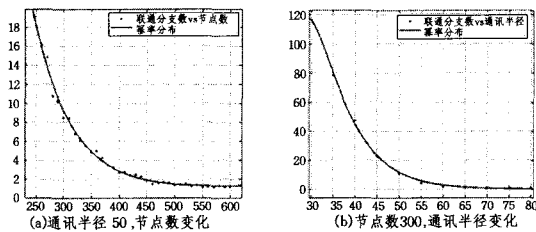


图5 撒布节点数与联通分支数的关系

在以上仿真中,节点撒布过于稀疏和过于密集的情况不作考虑,节点数与联通分支数大致服从幂率分布,图5为用 $y = a * e^{(b * x)} + c * e^{(d * x)}$ 函数拟合的结果,从图5(a)可以看出,当节点数达到450节点时,平均连通分支数已经小于2,也即网络已经表现为一个整体的联通网络,当节点数继续增加时,网络平均连通分支数目趋近于1,也即网络存在孤立节点或联通分支的概率趋近于0。同样地,当节点数目固定时,通讯半径的增大也使得网络快速地联通成为一个整体网络。

无线传感器网络应用广泛,因此传感器节点的造价和感知半径都会有所不同,由仿真的数据得出,增加节点不能完全保证网络的联通,只能增加联通的概率(可能有1~2孤立节点),而增加通讯半径则可以迅速地使网络联通。因此,在条件允许的情况下,选择通讯半径大的传感器,比增加撒布节点更能保证网络的联通。

3 无线传感器网络的拓扑度量

3.1 谱性质

度分布、聚类系数、平均路径长度网络联通性可以反映网络的静态性质。从整体上刻画网络拓扑性质,则需要用到复杂网络中定义的谱性质^[14]。

设 $A = [a_{ij}]$ 表示网络的邻接矩阵,如果 i 节点与 j 节点联通,则 $a_{ij} = a_{ji} = 1$ 否则 $a_{ij} = a_{ji} = 0$,那么 $D = \text{diag}(d_{v1}, d_{v2}, \dots, d_{vn})$ 表示网络的度对角矩阵,其中 d_{vi} 表示节点 V_i 的度,网络的拉普拉斯矩阵可以表示为 $L = D - A$ 。利用复杂网络给出的谱性质,研究 L 的特征值和特征向量,对无线传感器网络的全局结构进行全面的度量,再根据仿真得出的结论,可以更好地研究无线传感器网络的拓扑结构和动力学特性,从而可以使无线传感器网络的应用更加广泛和重要。

3.2 节点的介数

如果节点 V_i, V_j 之间有 B 条不同的最短路,有 b 条经过 V_k ,那么节点 V_k 对节点对的介数为 b/B 。 V_k 对所有节点对的贡献之和称为 V_k 的介数。

根据 Rahul, C. Shah 提出的能量多路径路由机制的解决办法,介数定义中的最短路用近似最短路来代替,则可以在无线传感器网络中描述节点或边的重要性,以此来研究网络的抗毁性、生存性等等。仿真结果显示,介数可以较好地反映网络中节点的重要性。

鉴于实际中无线传感器网络节点间不同的最短路径数量较少(可能仅有一条),并且如果频繁使用同一条路径传输数据,会造成该路径上的节点因能量消耗过快而过早失效,从而使网络分割成不联通的部分而减少网络的生存期,提出以下定义。

定义1 在无线传感器网络中,随机选取源节点 V_i ,已知 Sink 节点 V_j ,两节点组成节点对 (V_i, V_j) ,则 $D_m(i, j)$ 称为节点 V_m 关于链路 (V_i, V_j) 的节点重要度,其中

$$D_m(i, j) = \begin{cases} 0 & \text{当 } (V_i, V_j) \text{ 不联通} \\ \frac{1}{R_i} & \text{当 } V_m \text{ 在 } (V_i, V_j) \text{ 最短路} \end{cases}$$

R_i 表示 (V_i, V_j) 最短路除 V_i, V_j 外的节点的个数。

对源节点 V_i 进行遍历 $i \in [1, n]$,求得 $D_m(i, j)$ 的均值,记为节点对网络的重要度,以此定义得仿真结果,如图6所示。

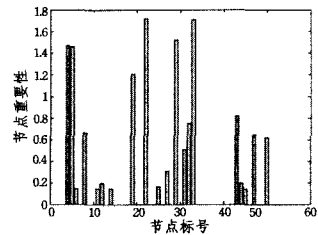


图6 网络中的节点重要度

结束语 通过对在复杂网络中常用的各个特征度量进行仿真,得出无线传感器网络的许多重要特征,各种特征度量对研究无线传感器网络的通信效率和能量效率具有十分重要的作用。在对无线传感器网络节点重要性的研究中,求得节点对于最短路的贡献大小,然后依此来求节点的重要性,比介数的原有的定义更有针对性。通过固定节点数,改变通讯半径,或固定通讯半径来改变节点数,便可以研究其与网络的连通率间的关系。考虑节点剩余能量及网络通讯量,可以进一步研究网络的整个抗毁性和生存性,这也是本文以后研究的重点。定量研究网络中的度量特征对无线传感器网络的节点实际撒布、网络拓扑控制以及能量利用具有参考意义。

参考文献

- [1] 王林,戴冠中. 复杂网络的度分布研究[J]. 西北工业大学学报, 2006, 24 (4): 405-409
- [2] 饶育萍,林竞羽,周东方. 网络抗毁度和节点重要性评价方法[J]. 计算机工程, 2009, 35 (6): 14-16
- [3] 丁琳,谭敏生,肖炜. 复杂网络抗毁性研究综述[J]. 电脑知识与技术, 2009, 5 (1): 51-53
- [4] 朱大智,吴俊,谭跃进,等. 基于度分布的复杂网络拓扑结构的构造[J]. 计算机仿真, 24 (08): 130-136

(下转第49页)

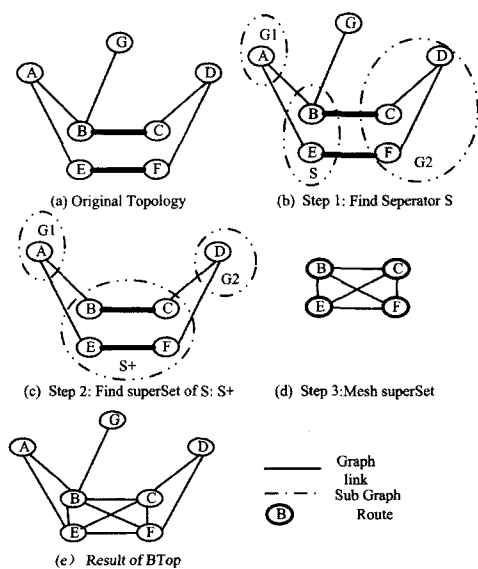


图3 BTop算法工作示例

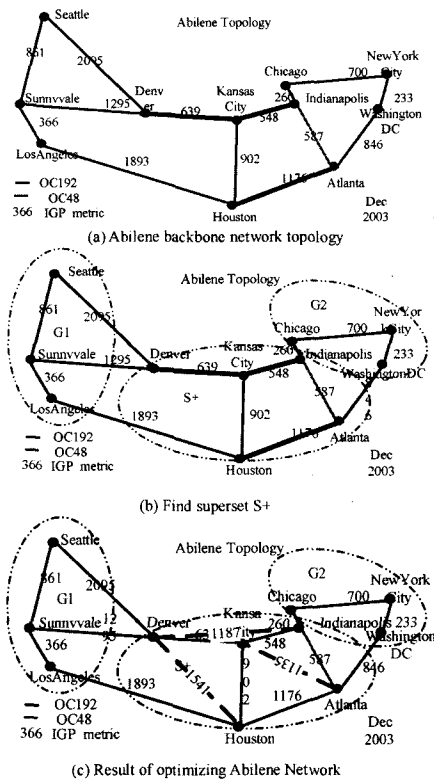


图4 Abilene核心网络拓扑优化结果

在步骤1中,算法选择路由器集合 $S = \{B, E\}$ 作为割集,分割出子图 $G_1 = \{A\}$ 和 $G_2 = \{C, D, F\}$ 。在步骤2中,因为C位于从D到B的最短路径上,F位于从D到E的最短路径上,C和F被加入到S中形成新的割集 $S^+ = \{B, C, E, F\}$ 。在步骤4中, S^+ 中的路由器中任意两个节点之间最短路径如果经过关键路径,则增加一条直连链路。由于关键链路连接的是拓扑图的割集节点,因此在此增加链路将改善关键链路的传输压力,提高网络整体性能。

4.2 Abilene上的实验

下面我们再举一个真实的网络拓扑美国教育科研网Abilene^[142]。Abilene核心网络拓扑由11个节点和14条双向链路组成,如图4所示。使用PCAR算法求得的关键链路为(Denver, KansasCity), (KansasCity, Indianapolis), (Houston, Atlanta),图中用粗线标注。

结束语 本文介绍了基于关键链路的网络拓扑优化算法BTop。BTop基于关键链路分析和图的顶点割来优化网络拓扑结构设计。论文用Abilene流量数据验证了BTop算法的有效性。

参考文献

- [1] Awduche D, Chiu A, Elwalid A, et al. Overview and Principles of Internet Traffic Engineering. Internet Engineering Task Force [S]. RFC3272, May 2002
- [2] Uhlig S, Bonaventure O, Magnin V, et al. Implications of the Topological Properties of Internet Traffic on Traffic Engineering [C]//Proc. of ACM SAC'04, March 2004
- [3] 孙雨耕,吕航,薛希俊.基于流量工程的新型Internet网络规划研究[J].电路与系统学报,2004,9(3):40-45
- [4] 叶大振,吴新余.基于遗传算法的计算机通信网优化设计[J].南京邮电学院学报,1996,16(06)
- [5] 刘东.基于改进遗传算法的可靠性网络优化设计[J].计算机技术与应用,2007,17(1):63-68
- [6] 雷霆,余镇.基于复杂网络理论的计算机网络拓扑研究[J].计算机工程与应用,2007,43(6)
- [7] 柴洪杰,黄周松,雷振明.基于测量的网络生成树拓扑优化[J].高技术通讯,2003(03)
- [8] 曹继伟,刘玉华,许凯华,等.基于初始环编码的遗传算法优化网络拓扑结构问题[J].计算机工程与应用,2006(26)
- [9] 王宏.网络综合流量管理关键技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2008
- [10] Daniel A, Spielman, Teng Shang-hua. Spectral Partition Works: Planar Graphs and Finite Element Meshes[C]//IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, 1996:96-105
- [11] Chen Y P, Liestman A L, Liu Jiang-chuan. A Hierarchical Energy-Efficient Framework for Data Aggregation in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(3)
- [12] Madan R, Lall S. Distributed Algorithms for Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(8)
- [13] Chang J-H, Tassiulas L. Maximum Lifetime Routing in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(4)
- [14] 章志忠,周水庚,方锦清.复杂网络确定性模型研究的最新进展[J].复杂系统与复杂性科学,2008,5(4):29-45

(上接第46页)

- [5] Bollobas B. Random graphs (2nd ed) [M]. New York: Academic Press, 2001
- [6] Erdos P, Renyi A. On random graphs [J]. Publicationes Mathematicae, 1959, 6: 290-297
- [7] Strogatz W. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. Nature, 1998, 393: 440-442
- [8] Barabasi A L, Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks [J]. Science, October 1999: 509-512
- [9] Ravasz E, Barabasi A L. Hierarchical organization in complex networks [J]. Physical Review E, 2003, 67: 026112
- [10] Albert R, Jeong H, Barabasi A L. Error and attack tolerance of complex networks [J]. Nature, 2000, 40: 378-382