

基于耦合系数的无标度网络模型(BA-S)的中心化研究

刘玉华¹ 郑梅容¹ 许凯华² 徐 翠¹

(华中师范大学计算机学院 武汉 430079)¹ (华中师范大学物理科学与技术学院 武汉 430079)²

摘 要 针对基于耦合系数的无标度网络演化模型中的节点进行中心化研究,首先对常用的中心化指标进行了分析,接着对经典的无标度(BA)模型和演化的BA-S模型中各节点的几种指标进行了累积概率分布研究,最后对两种模型的中心化程度和效率进行了中心化测试对比研究,结果证明,演化的BA-S模型较BA模型具有更强的鲁棒性以及抗故障的能力。

关键词 无标度网络,耦合系数,中心化指标,中心化程度,效率

中图分类号 TP393.01 **文献标识码** A

Centralization Research of Scale-free Network Model (BA-S) Based on Coupling Coefficient

LIU Yu-hua¹ ZHENG Mei-rong¹ XU Kai-hua² XU Cui¹

(Academy of Computer Science, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China)¹

(College of Physical Science and Technology, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China)²

Abstract The paper aimed at the centralization research on the scale-free network evolution model which is based on the coupling coefficient. At first it analyzed the centralization indexes which are frequently used, and then researched the cumulative probability distribution appoint to the several indexes on the nodes between classical scale-free (BA) model and the evolution (BA-S) model, finally researched the centralization degree and the efficiency for the two models. The results prove that the evolution (BA-S) model has a more robust and failure-resistant capability than the BA model.

Keywords Scale-free network, Coupling coefficients, Centralization index, Centralization degree, Efficiency

1 引言

19世纪,中心化最早用于估计样本点的集中化程度的参数。复杂网络中节点的中心化与传统统计学中样本点的中心化截然不同,前者建立在复杂的网络拓扑结构的基础之上,它摆脱了统计学中通过样本点的均值、中值估计样本集中化程度的思想。而在复杂网络的研究中,节点的中心化问题讨论的是节点在网络中的集中化程度,对复杂网络进行中心化测试使得我们能够在规模庞大、结构复杂的网络中准确而迅速地发现中心节点。复杂网络中存在很多与网络中心化程度以及网络中心节点有关的网络现象,如互联网恶意攻击的脆弱性、病毒传播网络的防御、交通网络、蛋白质交互网络中对集散节点的依赖等,应用网络中心化理论来解析网络中的各种现象,现实世界中的例子还有很多,也正是由于这些网络现象的不断出现,才引发了对中心化问题进一步的研究和思考,以此来解决更多网络实际问题。

社会网络中,权是被普遍承认的一个网络特性,经过多年的分析研究,中心化最终代替其它的网络参量成为衡量社会网络权值的最佳参数。同时,中心化还被应用于许多其它网

络系统,如通信网络(寻找网络的瓶颈、控制网络的拥塞)、社区网络(了解人群的生活空间和城市的布局)等。如今,中心化已经被成功地应用于公共安全和公共健康领域,同时还涉及流言、电子邮件、病毒感染等网络的研究分析,在分析对网络的蓄意攻击时,中心化的研究也发挥了重要作用。

对网络进行中心化研究是依靠各种中心化指标来实现的,不同类型的复杂网络通常需要使用不同的中心化指标来进行中心化。中心化指标用于定量地表示网络中一些节点比其他节点更重要或处于更中心的位置。继 Bonacich 于 1972 年提出了度的中心化测试指标之后,Freeman 等人又于 1979 年提出了紧密度、介数、特征向量等中心化测试指标。在众多测试指标中,Wasserman 等人选用度指标进行社会网络的中心化测试,Petter Holme 选用介数指标对交通网络进行中心化分析,为了更准确地找到网络的中心化节点,Petter Holme 等人还对同一网络分别进行了度指标和介数指标测试,通过对两种测试指标找到的中心化节点进行攻击,比较了两种中心化指标的测试效果。然而,单一的中心化测试方法往往存在不确定性,为了更加合理地找到复杂网络的中心化节点,这些参数往往需要结合起来使用,构成多重测试^[1]。在众多网

到稿日期:2012-07-03 返修日期:2012-11-01 本文受国家自然科学基金项目(61070197),华中师范大学中央高校基本科研基金项目(120002040476)资助。

刘玉华(1951—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机网络与通信技术、无线网络、复杂网络等,E-mail:yhliu@mail.ccnu.edu.cn(通信作者);郑梅容(1985—),女,硕士生,主要研究方向为复杂网络;徐 翠(1988—),女,硕士生,主要研究方向为复杂网络。

络模型的研究中,多重测试是被频繁使用的中心化测试方法。

中心化问题是复杂网络研究领域的一个重要课题之一,中心化测试的多项指标正是网络研究过程不断引入和应用的统计参量,中心化解的问题一般都是信息流动、拥塞控制和病毒传播等复杂网络问题,随着信息时代的不断发展,这类问题愈发明显,已是复杂网络研究的热重点,因此,利用中心化解决复杂网络的大部分问题更具说服力和鲜明性。

2 相关研究分析

中心化指标这一概念应用于复杂网络以来,各种中心化指标便被不断引入并且改进。作为测试网络节点中心化的参数,任何网络中的任何节点均可定义中心化指标,也可定义整个网络的中心化程度。

常见的网络中心化指标,根据它们所测试的模型中信息流动的模式不同而被应用于不同的网络模型。一部分指标建立在以最短路径为基础的模型上,认为网络中信息的流动只发生在最短路径上,如快递公司网点以及交通网,其选择的路径自然是最短路径。另一部分指标所依赖的模型认为信息的流动建立在轨迹、蔓延、行走等基础上,如物流中的快件,这个快件作为一个不可分割的事物在网络中进行传递的过程即为蔓延;电子邮件在网络中的传播,由于这种传递可以同时发生、并行复制,它可能会同时成倍地在不同的地方出现,这种过程称之为扩散。

目前,复杂网络中已经被引入和应用的中心化指标有很多种,比较有影响力的指标包括度、紧密度、介数、流介数、笔直性、影响力指标等。

(1) 度指标

度指标是研究无标度网络拓扑结构的基本参数,用于描述在静态局部网络中节点所产生的直接影响力^[2,3],其值为与该节点直接相连的节点数。设网络具有 n 个节点,则节点 i 的度指标定义为:

$$C_d(i) = d(i) \quad (1)$$

式中, $d(i)$ 表示与节点 i 直接相连的节点数,称为该节点的度。为了根据度指标来比较不同规模的网络中节点的中心化,需要对度指标进行归一化处理。注意具有 n 个节点的网络中节点度的最大值为 $n-1$,归一化的度指标定义为:

$$C_D(i) = \frac{C_d(i)}{n-1} \quad (2)$$

利用节点的度指标进行中心化,是因为节点的度值体现了该节点与其周围节点之间建立直接联系的能力。度指标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,在链式网络中没有反映出接近中心的节点的中心化程度高于其余节点。

(2) 紧密度指标

紧密度指标用于刻画全局静态网络中的节点通过网络到达网络中其它节点的难易程度,其值定义为该节点到达所有其它节点的最短距离之和的倒数。设网络具有 n 个节点,则节点 i 的紧密度指标定义为:

$$C_c(i) = \left[\sum_{j=1}^n d_{ij} \right]^{-1} \quad (3)$$

在具有 n 个节点的网络中,节点到达所有其他节点的最短距离之和的最小值为 $n-1$,则归一化的紧密度指标定义为:

$$C_C(i) = (n-1)C_c(i) \quad (4)$$

紧密度指标则反映的是节点通过网络对其它节点施加影响的能力,因而紧密度指标较度指标更加能够反映网络全局的结构。应用紧密度指标进行中心化不仅考虑到了节点度值的大小,而且还考虑到了节点在网络中所处位置的 centrality。它可以用于快件在最短路径中的传递,其链路只可能被使用一次,且易于在最短路径上向整个网络扩散。紧密度指标测试值越大,表明节点影响能力越大,网络的平均路径越短。

(3) 介数指标

介数指标刻画了动态网络中的节点对于信息流动的影响力。设网络具有 n 个节点,则节点 i 的介数指标定义为:

$$C_b(i) = \sum_{j < k} g_{jk}(i) / g_{jk}, (j, k \neq i) \quad (5)$$

式中, g_{jk} 表示节点 j 和节点 k 之间的最短路径数, $g_{jk}(i)$ 表示节点 j 和节点 k 之间经过节点 i 的最短路径数。注意,在具有 n 个节点的网络中,对于给定节点 i 来说,最为极端的情形是任意两个其它节点之间的最短路径均经过节点 i ,此时,该节点的介数指标达到最大值。因而,归一化的介数指标可以定义为:

$$C_B(i) = C_b(i) / [(n-1)(n-2)/2] \quad (6)$$

介数指标中引进了信息流动的概念,在使用最短路径路由算法的网络中,介数指标刻画了信息流经给定节点的可能性,任一节点的介数指标均会随着经过该节点的信息流的增加而增大,利用介数指标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能通过介数指标加以确定,如表 1 中的节点 7、11,它们处于网络的中心位置,但是其介数指标测试值反而偏低。

表 1 14 个节点的网络进行中心化测试的结果

节点号	CD	CC	CB	CF
1	0.384	0.541	0.474	0.634
3	0.384	0.541	0.474	0.634
2	0.384	0.481	0.435	0.634
7	0.153	0.419	0.205	0.384
11	0.153	0.419	0.205	0.384
4	0.076	0.361	0.000	0.000
5	0.076	0.361	0.000	0.000
6	0.076	0.361	0.000	0.000
8	0.076	0.361	0.000	0.000
9	0.076	0.361	0.000	0.000
10	0.076	0.361	0.000	0.000
12	0.076	0.361	0.000	0.000
13	0.076	0.361	0.000	0.000
14	0.076	0.361	0.000	0.000

(4) 流介数指标

流介数用于计算信息在网络中任意流动经过给定节点的次数,它没有路径和流通过数的要求,可用于信息连续复制的情况。流介数指标去除了最短路径的概念来定义介数,因而流介数指标能够确定整体上的集合中心节点^[4,5]。流介数指标定义为:

$$C_f(i) = \sum_{j < k} \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}}, (j, k \neq i) \quad (7)$$

式中, g_{jk} 表示节点 j 和节点 k 之间的所有路径数, $g_{jk}(i)$ 表示节点 j 和节点 k 之间经过节点 i 的所有路径数。显然其归一化的流介数指标为:

$$C_F(i) = C_f(i) / [(n-1)(n-2)/2] \quad (8)$$

笔直性指标测试的是给定节点背离其他节点对直线距离的程度,如某路口是否位于交通大道上。影响力指标测试是

中心化测试指标中的一个例外,它测试的不是给定节点的中心化值,而是在移去与给定节点相连的边后,对网络效率降低的情况进行的分析和排序。

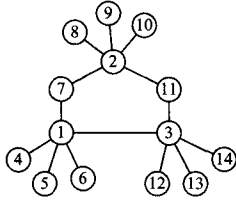


图 1 当 $N=14$ 时,用于 4 种中心化测试的网络模型

表 1 就是由图 1 的网络模型计算得到的,其中 CD 代表度指标的测试值、CC 代表紧密度指标的测试值、CB 代表介数指标的测试值、CF 代表流介数指标的测试值。

如表 1 所列,在 14 个节点中,节点 1、3 是具备影响力大、信息灵通等优势的中心节点。在网络中,这类节点是被保护和利用的关键节点。

3 BA-S 模型^[6]中心化测试模拟

基于经典的 BA 无标度网络模型以及文献[6]所提出的 BA-S 基于耦合系数的无标度网络演化模型,本节对其进行了以下两方面的中心化分析:

(1) 中心化测试方式:本节分别采用了度指标、紧密度指标、介数指标、流介数指标 4 种常见的中心化指标,对构造的 BA 模型、BA-S 模型的 3000 个节点进行了中心化排序。

(2) 中心化分布规律:根据 BA 模型、BA-S 模型的中心化测试值,绘制其测试值的累计分布,并指出其分布规律,从而对比确定选用的中心化指标所对应的网络拓扑类型。

本节中 BA 模型网络以及 BA-S 模型网络分别是针对 3000 个节点根据 BA 模型以及 BA-S 模型生成而来,这些节点中 85% 的节点拥有 15% 的连接数,15% 的节点拥有 85% 的连接数,节点度值符合幂律分布,网络中的中心化差异非常明显。

BA 模型中节点最大的度值为 0.025448,最小度值为 0.000360,其中中心化的累积分布如图 2 所示。

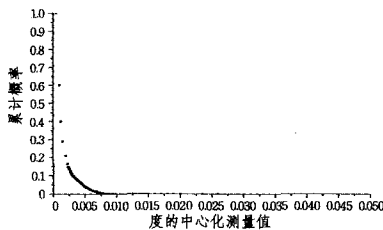


图 2 BA 模型中度的中心化测试值

BA-S 模型中节点最大的度值为 0.071508,最小度值为 0.000027,中心化的累积分布如图 3 所示。

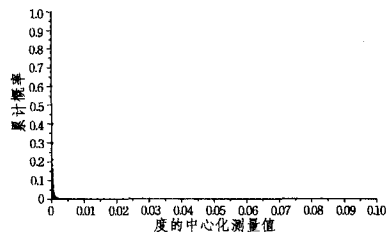


图 3 BA-S 模型中度的中心化测试值

由图 2 和图 3 可以看出,BA-S 模型中在局域范围内节点

与其周围节点建立连接的能力更强。

BA 模型中节点最大的紧密度测量值为 0.229524,最小为 0.121260,其中中心化的累积分布如图 4 所示。

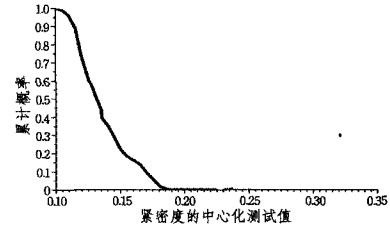


图 4 BA 模型中紧密度的中心化测试值

BA-S 模型中节点最大的紧密度测量值为 0.340125,最小为 0.118681,其中中心化的累积分布如图 5 所示。

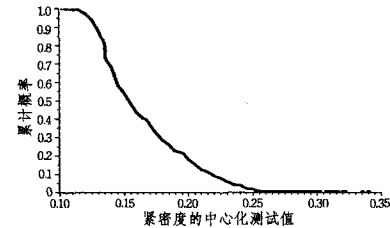


图 5 BA-S 模型中紧密度的中心化测试值

由图 4 和图 5 可以得出,紧密度指标能更好地反映处于中心位置的节点的地位,BA-S 模型的测试值相对显著。

BA 模型中节点最大的介数测量值为 0.071015,最小为 0.000002,其中中心化的累积分布如图 6 所示。

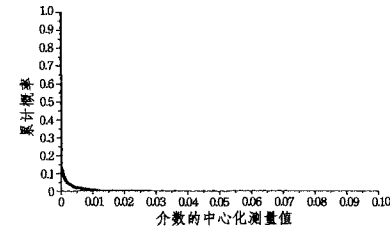


图 6 BA 模型中介数的中心化测试值

BA-S 模型中节点最大的介数测量值为 0.103420,最小为 0.000000,其中中心化的累积分布如图 7 所示。

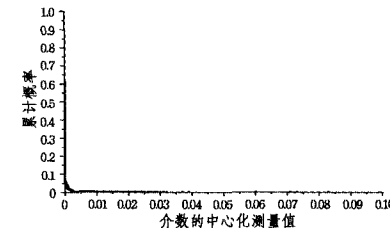


图 7 BA-S 模型中介数的中心化测试值

由图 6 和图 7 容易得出,BA-S 模型中只存在极少数中心化测试值较高的节点,网络的中心化差异较 BA 模型要相对显著,也就是说,该网络模型对中心化节点的依赖程度更高,其平均路径相对较短。在该网络中,度指标和介数指标的中心化测试效果同样显著。

综上所述,在网络中节点数相同的情况下,这 3 种指标的测试值对比图显示出,度和介数的测试结果相对较好,BA-S 模型介数测试的中心化节点的个数明显多于 BA 模型,而且介数对中心节点的测试结果更加准确。

4 BA-S 模型中心化程度的量化分析

前面对中心化指标的标准、几种常见的网络中心化指标

以及对两种网络模型进行了中心化对比。但是如果网络中存在大量的中心节点,即如果该网络趋于均匀网络,那么寻找中心节点也就没有意义了;如果一个网络更趋于非均匀网络,网络中节点度的差异很大,那么该网络中心化程度就会越高。本节将通过攻击前后网络中心化程度值以及效率来定量刻画两种网络的中心化程度。

4.1 网络的综合中心化公式

复杂网络中心化的研究起源于社会网络模型,最经典的即为 Freeman 综合中心化公式,其对网络中心化程度的刻画是基于网络中已定义好的中心化指标,假定在具有 n 个节点的网络 w 中已定义了中心化指标 C_A ,则网络的中心化程度定义如下^[7]:

$$C_A = \frac{\sum_{i \in W} (C_A^* - C_A(i))}{(n-1)\max(C_A^* - C_A(i))} \quad (9)$$

式中, $C_A^* = \max_{i \in W} C_A(i)$ 。

由式(9)可知,非均匀网络的幂律特性使得其节点的度差异较大,则网络中节点的中心化差异较大,得出的 C_A 值也就越大,那么通过计算得出的中心节点的准确率也就越高。

如将中心化指标的式(1)代入中心化程度式(9),可以得到网络相应的中心化程度。网络中度指标的最大值为 $n-1$,最小值为 1,那么其基于度指标的网络中心化程度为:

$$C_A = \frac{\sum_{i \in W} (n-1-C_d(i))}{(n-1)(n-2)} \quad (10)$$

根据式(10)计算可知,在有 n 个节点的星型网络中,其基于度指标的中心化程度指标为 1。

同理,可计算出基于其他指标的中心化程度的定义公式,基于紧密度的网络中心化程度定义为:

$$C_A = \frac{\sum_{i \in W} (n-1-C_c(i))}{(n-1)(n-2)/(2n-3)} \quad (11)$$

4.2 效率参数的概念

效率是刻画网络拓扑结构的特征参数之一,经常用于描述信息在动态网络上的扩散和控制类的问题^[8,9],本节引用效率来评定网络的中心化指标,旨在利用它对不同网络攻击前后进行测试。在两个节点之间构建最短路径长度 d_{ij} ,效率则为在有 n 条边的网络 w 中任意两个节点之间最短路径长度倒数之和的平均值,其公式表示为:

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i,j \in W, i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (12)$$

由式(12)可知,效率越高,说明网络中节点的连接越紧密,反之,说明节点的连接越疏松。在动态网络中,效率越高,信息在网络中的传输越快。因此,将效率引入中心化指标的评定,不仅可以定量比较中心化指标的适用场合,还有助于探讨在不同的网络中,由于攻击中心化节点而导致的网络效率下降的情况,因而将中心化与网络动力学分析紧密联系起来。

4.3 两种网络模型的评定结果

根据上述研究,本节将计算两种网络模型受到攻击前后其中心化程度值和效率值的对比,定量地刻画各种中心化指标的测试效果,两种网络模型的规模与第 3 节所述规模一致。

网络中的攻击策略一般分为随机攻击和蓄意攻击,本节为了更直接地说明问题,选择对构造的网络进行蓄意攻击。根据基于各种指标的网络中心化程度公式,在构造网络的 3000 个节点中选取了中心化程度值排列靠前的 25 个节点进

行计算,得到如表 2 所列的数据。

表 2 两种网络模型受到攻击前后的中心化程度值

网络模型		度的中心化程度值	紧密度的中心化程度值	介数的中心化程度值
BA 模型	攻击前	0.04106	0.22507	0.14459
	攻击后	0.03825	0.19431	0.11097
BA-S 模型	攻击前	0.04537	0.31065	0.20681
	攻击后	0.04382	0.29613	0.18294

容易发现,其测试结果对两种网络的构造方式有很大的依赖性。从表 2 可以看出,BA-S 模型的中心化程度更高,其测试结果更准确,在遭受主动攻击后网络结构能更好地保持其稳定性。然而使用中心化程度的测试思想对表格进行横向对比可以发现,对两种网络拓扑结构来说,理论上程度高的紧密度测试指标测试网络中的中心节点更加准确,而这一结论与第 3 节中的仿真结果差异较大,下面通过效率指标对这一结果进行修正。

根据第 4.2 节中效率式(12)计算得出如表 3 所列的数据,其中 DC 代表选择性攻击网络中度指标较大的节点,CC 代表攻击网络中紧密度指标较大的节点,BC 代表攻击网络中介数指标较大的节点。从表 3 容易发现,攻击前,BA-S 模型的效率略高于经典的 BA 模型,该模型中占网络结构中 0.83% (即 3000 个节点中的 25 个节点)的中心化节点控制了网络至少 19.81% 的初始效率,同时控制了该网络至少 15.87% 的初始连接数,中心化节点对网络的拓扑结构具有绝对深远的影响力。当 BA-S 模型遭遇攻击后,其效率降低的程度相比 BA 模型要略高,证明了该扩展模型具有更好的聚类特性。通过对比可以发现,在降低网络效率方面 BA-S 模型基于 BC 的攻击策略比基于 DC 的攻击策略更有效,这一结论正好反映了 BA-S 模型同时兼具无标度和小世界特性,对降低现实网络的效率更具有代表性。而其通过度指标和介数指标的中心化测试得到的中心化节点在网络攻击方面更具有显著的效果,被攻击方应该加强对这些中心化节点的保护,使得网络具有更强的鲁棒性。

表 3 两种网络模型攻击前后效率对比

参数	攻击前	攻击后	下降比例
BA 模型	连接边	DC 攻击	7627 15.21%
		CC 攻击	7811 13.16%
		BC 攻击	7643 15.03%
	效率	DC 攻击	22.18% 20.65%
		CC 攻击	22.79% 18.47%
		BC 攻击	22.27% 20.31%
BA-S 模型	连接边	DC 攻击	7609 17.94%
		CC 攻击	7801 15.87%
		BC 攻击	7677 17.21%
	效率	DC 攻击	22.55% 23.74%
		CC 攻击	23.71% 19.81%
		BC 攻击	22.16% 25.06%

结束语 研究表明,复杂网络中存在很多与网络中心化程度以及网络中心节点有关的网络现象,如互联网的脆弱性、航空网络的节点之间不平等、交通网络的拥塞、病毒传播网络的防御、蛋白质交互网络中对集散节点的依赖等。通过几种中心化指标来对该网络模型受到攻击前后的拓扑结构变化进行研究,实例分析表明,该扩展模型在攻击前后网络的拓扑结

(下转第 102 页)

当有数据传输时, BLE 芯片需要更长的时间用于数据处理, 耗能更多。由表 2 可知, 一方面, 随着连接间隔的增长, 唤醒时长也随之增大, 一次连接事件消耗了更多的能量; 另一方面, 连接间隔越大, 芯片处于休眠模式总时间的比例越大。综合以上因素可知, 一定电量电池的寿命与连接间隔的大小相关。得到一次连接事件的唤醒时长和功耗, 可以估计出 BLE 芯片的平均功率。假设一块纽扣电池的电量为 230mAh, 根据平均功率可计算出典型连接间隔下纽扣电池的寿命, 如图 8 所示。

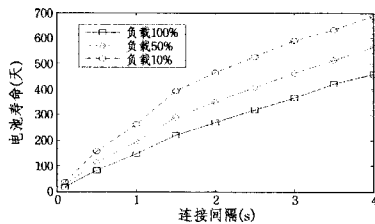


图 8 不同连接间隔和负载下 230mAh 电池可用天数

在图 8 中, 负载表示有数据传输连接事件所占的比例(如当连接间隔为 100ms 时, 每秒传输一次数据的负载为 10%)。一块纽扣电池的使用时间, 随连接间隔的增大呈线性增长。在满足需求的情况下, 如果要降低平均功耗, 可以采用增大连接间隔或降低负载的方法。由图 8 的结论知道, 基于本文描述的体系结构, 一块纽扣电池可以持续工作数月至数年之久, 满足大多数应用场景对低能耗的需求。

结束语 本文设计和实现了一种基于低功耗蓝牙技术的端到端 IPv6 的物联网体系结构, 避免了基于代理方式互联异构网络的不足, 提高了异构网络的互操作性、数据传输的透明性和协议栈的通用性。基于 RESTful 的 CoAP 应用层协议提供了一种类似于 HTTP 的资源获取方式, 具有良好的扩展性。实验结果表明, 整个体系结构可以在资源受限的低功耗蓝牙节点上运行, 其对存储空间和处理器资源的消耗不会超过节点的硬件限制。实际测量的能耗数据表明, 系统的能耗极低, 可以满足对能耗敏感的物联网应用系统的需求。

本文提出的新型物联网体系结构, 在不显著增加系统的负担的情况下, 实现了低功耗蓝牙传感网与因特网之间的端

到端 IPv6 通信, 并且提供了一种友好的传感数据获取方式。

参 考 文 献

- [1] Sig B. Bluetooth Specification version 4.0[S]. June 2010
- [2] Dunkels A, Voigt T, Alonso J. Making TCP/IP Viable for Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of the First European Workshop on Wireless Sensor Networks(EWSN 2004). Work-in-progress session, Berlin, Germany, Jan. 2004
- [3] Vasseur J-P, Dunkels A. Interconnecting Smart Objects with IP the Next Internet[M]. Morgan Kaufmann, 2010
- [4] Rodrigues Joel J P C, Neves Paulo A C S, et al. A survey on IP-based wireless sensor network solutions[J]. Int. J. Commun. Syst., 2010, 8:963-981
- [5] Nieminen J, et al. Transmission of IPv6 Packets over Bluetooth Low Energy[M]. Internet-Draft, 6LoWPAN Working Group (6lowpan), March 2012
- [6] RFC4944. Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks[OL]. <http://tools.ietf.org/html/rfc4944>
- [7] Hui J W, Culler D E. IP is Dead, Long Live IP for Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of the 6th ACM International Conference on Embedded Networked Sensor System, SenSys'08. ACM, New York, 2008
- [8] RFC6282. Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks[OL]. <http://datatracker.ietf.org/doc/rfc6282/>
- [9] Kamath S. Measuring Bluetooth® Low Energy Power Consumption. Texas Instruments [OL]. <http://www.ti.com/lit/an/swra347a/swra347a.pdf>
- [10] Selvig B. Measuring power consumption with CC2430 & Z-Stack. Texas Instruments [OL]. <http://www.ti.com/lit/an/swra144/swra144.pdf>, 2007-07-08
- [11] Colitti W, Steenhaut K, De Caro N. Integrating Wireless Sensor Networks with the Web[C]//Proc. IP+SN. Chicago, IL, USA, 2011
- [12] Kovatsch M, Duquennoy S, Dunkels A. A Low-Power CoAP for Contiki[C]//Proc of the Workshop on Internet of Things Technology and Architectures(IEEE IoTech 2011). Spain, Oct. 2011

(上接第 73 页)

构没有发生明显变化, 表明其具有更高的抗故障能力。

参 考 文 献

- [1] 杨海波, 陈国友, 王智学, 等. 网络中心化决策优势建模及分析[J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32(1):26-29
- [2] Daniel G, Enrique G A, Conrado M, et al. Centrality and power in social network; A game theoretic approach [J]. Mathematical Social Sciences, 2003, 46(1):27-54
- [3] 张翼, 刘玉华, 许凯华, 等. 一种基于互信息的复杂网络节点重要性评估方法[J]. 计算机科学, 2011, 38(6)
- [4] Freeman L C, Borgatti S P, White D R. Centrality in valued graphs; A measure of betweenness based on network flow [J]. Social networks, 1991, 13(2):141-154
- [5] 仲里, 拜丽萍, 郝政疆, 等. 构建网络中心化的军事电子信息系统[J]. 国防技术基础, 2009(07)
- [6] 郑梅容, 刘玉华, 许凯华, 等. 基于耦合系数的无标度网络建模[J]. 计算机科学, 2012, 39(5):66-68, 82
- [7] 陶少华, 刘玉华, 许凯华, 等. 基于容量维度的复杂网络自相似性研究[J]. 计算机工程, 2008, 34(2):175-177
- [8] Xu Kai-hua, Meng Yong-wei, Liu Yu-hua, et al. An Effective Method to Improve the Resistance to Frangibility in Scale-free Networks[C]//The 13th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE-2010). IEEE Computer Society, Hongkong, China, December 2010:11-13
- [9] 张婧婧, 李全胜, 达新民. 一种评定复杂网络的中心化程度的新方法[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2006, 3(1):13-20