

平均度约束的无线传感器网络拓扑控制

陈力军^{1),2)} 毛莺池^{1),2)} 陈道蓄^{1),2)} 谢立^{1),2)}

¹⁾(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)

²⁾(南京大学-香港理工大学无线与移动传感器网络计算联合实验室 南京 210093)

摘 要 拓扑控制是无线传感器网络中最重要的技术之一. 大规模随机部署的无线传感器网络节点, 在满足无线传感器网络拓扑连通性的前提下, 如何保证网络结构的稀疏性是一个亟待解决的问题, 目前已有的研究结果表明当节点密度较大时, 得到的网络拓扑复杂, 计算路由将严重消耗节点资源. 文中提出了一种平均度约束的无线传感器网络拓扑控制, 通过增加节点通信半径, 约束节点的平均度来解决网络的连通性与网络拓扑的稀疏性之间的矛盾. 数值模拟表明: 通过平均度约束的无线传感器网络拓扑控制, 可减少网络中选出的工作节点数, 保证了网络的稀疏性, 简化了路由的复杂度, 从而延长了网络的生存周期.

关键词 无线传感器网络; 随机图; 平均度; 约束; 拓扑控制

中图法分类号 TP393

Topology Control of Wireless Sensor Networks Under an Average Degree Constraint

CHEN Li-Jun^{1),2)} MAO Ying-Chi^{1),2)} CHEN Dao-Xu^{1),2)} XIE Li^{1),2)}

¹⁾(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093)

²⁾(The Cooperative Laboratory for Mobile and Wireless Sensor Networks of Nanjing University and Hong Kong Polytechnic University, Nanjing 210093)

Abstract Topology control is one of the most important technologies in wireless sensor networks. In the precondition of the topology connectivity of wireless sensor networks, how to solve the sparseness of the network topology is a very important problem in a large number of sensor nodes deployed randomly. Existing topology control schemes show that network topology is complex and routing process consumes the resources heavily. This paper presents the topology control of wireless sensor networks under an average degree constraint. With increasing communication radius and constraining node degree, the inconsistency of network topology connectivity and sparseness can be solved. The simulation and analysis study demonstrate that proposed scheme can decrease working nodes, guarantee network topology sparseness, predigest routing complexity and prolong network survival period.

Keywords wireless sensor networks; random graph; average degree; constraint; topology control

1 引 言

无线传感器网络是由大量无处不在的、具有无

线通信与计算能力的微小传感器节点构成的自组织分布式网络系统. 通信技术的发展使人们不再满足于单个传感器独立的对环境进行感知, 而是希望通过传感器之间的相互协作与通信完成更为广泛与精

收稿日期: 2005-11-09; 最终修改稿收到日期: 2007-04-29. 本课题得到国家自然科学基金面上项目“基于复杂网络理论的无线传感器网络拓扑控制”(60573132)、江苏省高技术研究(工业部分)项目“高性能无线传感器网络操作系统研究”(BK2006029)和国家“九七三”重点基础研究发展规划项目“无线传感网络的基础理论及关键技术研究”(2006CB303000)资助. 陈力军, 男, 1961年生, 教授, 研究领域为分布式计算、无线传感器网络. E-mail: chenlj@nju.edu.cn. 毛莺池, 女, 1976年生, 博士研究生, 研究方向为分布式计算、无线传感器网络. 陈道蓄, 男, 1947年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为分布式计算、普适计算. 谢立, 男, 1942年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为分布式计算、网络安全.

细的监测任务,并且把监测的数据以及部分处理的结果通过网络传送给相应的用户,完成更为复杂的计算、分析以及处理.由于无线传感器网络无需固定设备支撑,可以快速部署,同时具有易于组网、不受有线网络的约束等优点,将被广泛应用于灾难自救、医疗救护、环境检测、森林火险报警、火山监测和军事领域.

国际上,无线传感器网络引起了学术界、军界和工业界的极大关注,许多重要的计算机和无线通信的研发组织已深刻地认识到了这个问题,进行了无线传感器网络的基础理论和关键技术的研究.目前由微型传感器节点组成的无线传感器网络已经发展成为一个重要的计算平台^[1-2].

无线传感器网络与无线自组网不同,由于受到成本以及体积等原因的限制,无线传感器节点的处理能力、通信带宽以及电池容量等资源更为有限.尤其是在多数应用中,传感器节点的能量无法得到补充,这使得如何有效利用能源,延长网络的工作寿命成为需要考虑的关键因素之一.本文将借助于随机图理论,针对大规模随机部署的无线传感器网络的特点,通过约束节点的平均度来简化网络拓扑,以延长网络的生命周期.

2 研究背景

无线传感器网络的拓扑控制就是在保证连通性的同时,使网络的通信结构满足稀疏性的要求,以减少选出的工作节点数,简化通信节点间的路由机制,从而降低对节点能量的消耗.但目前该研究还处在起步阶段,大量的研究问题还没有涉及到,可参考的文献有限.

Ramathan^[3]等提出了静态网络拓扑的两个集中式算法,在保证网络连通性的同时,可减少节点的传输功率;提出了移动网络拓扑的两个分布式启发算法,通过调节发射功率以适应结构变化对网络连通性的影响;分析了算法对网络吞吐量、网络延迟和节点功率损耗的影响,结果表明在此结构控制的策略下,虽然网络性能有所改善,但启发式算法不能保证网络的连通性. Liu^[4]等假定网络中的节点具有不同的最大传输功率,节点在其最大发射功率下形成的拓扑记为 G ,其拓扑控制算法的目的即从 G 中得到子拓扑 G' ,使得各节点保持原有可达性(reachability)的同时,能够以最小的发射功率工作,从而节约能量,提高能量使用的有效性.然而该算法当节

点密度较大时,如果节点仍以最小发射功率与其他节点通信,那么得到的网络拓扑变得更为复杂,计算路由将严重消耗节点资源. Li^[5]等提出了两个拓扑控制方法,简称 GRNG 和 DLMST 算法.其证明了该算法产生的网络拓扑保证了网络的连通性和双向性,同时在 DLMST 产生的结构中,任意节点的出边数(out degree)是有界的,而由 GRNG 产生的结构出边数(out degree)却是无界的.遗憾的是该项研究没有涉及到当网络中的节点以不同的功率发射时,节点的密度与通信半径之间的关系,然而这对无线传感器网络的连通性和稀疏性是至关重要的.

无线传感器网络拓扑控制的研究必然会涉及到网络的连通性. Zhang^[6]等研究了在最小节点数的条件下,维持网络覆盖和连通的方法.提出了一个分布的和本地化的节点密度控制算法——OGDC.但该算法要求节点通信半径是节点感知半径的两倍,这将增加节点间路由的复杂性,从而影响了无线传感器网络对通信结构简单性的要求. Xue^[7]等分析了在多跳无线网络中节点的邻居数与整个网络连通性之间的关系,证明了 n 个被随机部署的节点,要保证网络的连通性,每个节点应该连接到 $\theta(\log n)$ 个最近的邻居节点.然而对于大规模随机部署的无线传感器网络,在部署区域内通常存在大量的冗余节点,该算法由于没有考虑节点通信半径对邻居节点数的影响,因而无法解决节点密度与稀疏性之间的问题.

尽管目前已有学者对网络的拓扑控制进行了分析研究,但都没有从理论上解决网络的连通性与稀疏性的问题,为此,我们将从无线传感器网络节点的邻居数^[8-9]、节点的通信半径和网络的节点数等参数去寻求网络连通性、路由机制简单性和节点稀疏性之间的关系.

3 无线传感器网络节点的度及连通性分析

对大规模随机部署的无线传感器网络节点而言,要保证有这些节点构成的网络能完成通信任务,那么在每个节点的通信半径内至少要有一个邻居节点.而邻居节点的多少与网络覆盖的稀疏性有着直接的关系.邻居节点越多,网络的连通性越好,但同时,也增加了网络拓扑中边的条数和网络中的干扰,加重了路由选择的复杂性.为了使生成的网络拓扑中节点数较少,可以通过降低节点的度数,以减少节点转发消息的数量.

我们将通过随机图理论^[10-11]来分析和研究节点的通信半径 R 、节点度 z 及区域 A 中的节点数 N 之间的关系, 将从二维平面和三维空间分别讨论之.

3.1 二维平面节点的度

根据概率论中几何概率的定义, 无线传感器网络节点位于面积为 A 的一个平面区域内的概率 p_{2D} 可定义为

$$p_{2D} = \frac{\pi R^2}{A} \tag{1}$$

其中 R 为无线传感器网络节点的通信半径. 那么随机选取的节点具有 k 个邻居节点的概率:

$$p_k = \binom{N-1}{k} p_{2D}^k (1 - p_{2D})^{N-1-k}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N \tag{2}$$

因此, 无线传感器网络节点的平均度

$$z = \sum_{k=0}^{N-1} k p_k = \sum_{k=0}^{N-1} k \binom{N-1}{k} p_{2D}^k (1 - p_{2D})^{N-1-k} \tag{3}$$

将式(1)代入式(3), 可得

$$\begin{aligned} z &= \sum_{k=0}^{N-1} k \binom{N-1}{k} \left(\frac{\pi R^2}{A}\right)^k \left(1 - \frac{\pi R^2}{A}\right)^{N-1-k} \\ &= (N-1) \frac{\pi R^2}{A} \end{aligned} \tag{4}$$

图 1 是部署在区域 $A = 200 \times 200\text{m}^2$ 内的无线传感器网络, 当节点数分别为 $N = 600, N = 800$ 和 $N = 1000$ 时, 取节点通信半径为 $R = 10\text{m}$, 随机选取的节点具有 k 个邻居节点的概率分布图. 从图中可知, 随着区域中部署节点数 N 的增加, 在相同 p_k 情况下, 网络中 k 的分布也随之增加. 整个曲线向右移动.

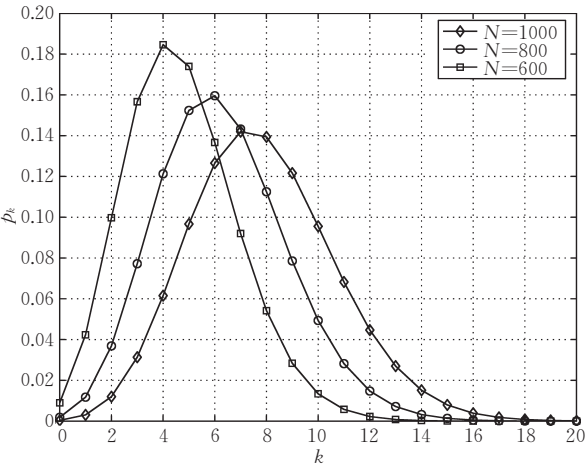


图 1 网络节点数 N 取不同值时, 具有 k 个邻居节点的概率分布图 ($R = 10\text{m}$)

3.2 三维空间节点的度

设三维空间的体积为 V , 如果无线传感器网络节点位于 V 内个各点处的可能性相等, 即在该空间内任何部分的可能性与这部分的体积成正比. 那么, 节点在空间体积为 V 区域内的概率可表示为

$$p_{3D} = \frac{\frac{4}{3}\pi R^2}{V} \tag{5}$$

其中 R 为无线传感器网络节点的通信半径. 因此, 无线传感器网络节点在三维空间节点的平均度为

$$\begin{aligned} z &= \sum_{k=0}^{N-1} k p_k = \sum_{k=0}^{N-1} k \binom{N-1}{k} \left(\frac{\frac{4}{3}\pi R^2}{V}\right)^k \left(1 - \frac{\frac{4}{3}\pi R^2}{V}\right)^{N-1-k} \\ &= (N-1) \frac{\frac{4}{3}\pi R^2}{V} \end{aligned} \tag{6}$$

3.3 连通性分析

根据随机网络^①, 无线传感器网络节点的平均度 z 在不同范围取值时, 可有如下结果:

- (1) $z < 1$, 网络内部有孤立的节点, 网络由孤立的树型结构组成;
- (2) $z \in (1, \ln(N))$, 网络出现连通, 同时形成簇;
- (3) $z \geq \ln(N)$, 整个网络互联.

大规模随机部署的节点在网络节点数 N 、二维平面部署区域 A 或三维空间区域 V 确定后, 无线传感器网络的连通性, 即节点的平均度由通信半径 R 唯一确定.

根据式(4), 当二维平面节点的平均度 $z \in (1, \ln(N))$ 时, 网络通信半径 R 在如下范围内变化:

$$R \in \left(\sqrt{\frac{A}{(N-1)\pi}}, \sqrt{\frac{A \ln(N)}{(N-1)\pi}} \right) \tag{7}$$

4 邻居节点数与平均路径长度 l

根据随机图理论^[8-9], 概率产生函数(probability generating function)是概率分布 p_k 的另一种表达形式, 可用于研究随机图的性质. 它具有以下函数关系:

$$G_0(x) = \sum_{k=0}^{\infty} p_k x^k \tag{8}$$

很显然, 该表达式包含所有 p_k 原有的节点度分布的信息, 因为我们可以将 p_k 从 $G_0(x)$ 中求出:

$$p_k = \left[\frac{1}{k!} \frac{d^k G_0}{dx^k} \right]_{x=0} \tag{9}$$

因此可以认为 $G_0(x)$ “产生”了 p_k 而被称为概率产

① Jan Porekar. Random Networks. http://www-fl.ijis.si/~rudi/sola/Random_Networks.pdf

生函数. 对于大规模随机部署无线传感器网络, 我们有

$$p_k = \binom{N-1}{k} p_{2D}^k (1 - p_{2D})^{N-1-k} \approx \frac{z^k e^{-z}}{k!} \quad (10)$$

此时 $G_0(x)$ 可表示为

$$G_0(x) = e^{-z} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{k!} x^k = e^{z(x-1)} \quad (11)$$

如果我们称 p_k 是第一个邻居节点 (first neighbors) 的概率分布, 那么第二个邻居节点 (second neighbors) 的概率分布 q_k 就是一个随机选择的节点 A 两步以外 (two steps away) 节点度的概率分布. 同样地可以定义 q_k 的概率产生函数 $G_1(x)$ 为

$$G_1(x) = \sum_{k=0}^{\infty} q_k x^k \quad (12)$$

而在大规模随机部署无线传感器网络中, q_k 与 p_k 具有完全相同的表示形式, 因而有

$$G_1(x) = \sum_{k=0}^{\infty} q_k x^k = e^{z(x-1)} \quad (13)$$

那么第一个邻居节点度的均值应该等于整个网络的平均度, 即

$$z_1 = z = \langle k \rangle = \sum_{k=0}^{\infty} k p_k = G'_0(1) \quad (14)$$

类似于概率产生函数, 第二个邻居节点度均值的产生函数可表示为

$$\sum_{k=0}^{\infty} p_k [G_1(x)]^k = G_0(G_1(x)) \quad (15)$$

因此, 第二个邻居节点度的均值可由以下公式给出:

$$z_2 = \left[\frac{dG_0(G_1(x))}{dx} \right]_{x=1} = G'_0(1) G'_1(1) \quad (16)$$

对于无线传感器网络, z_2 可表示为

$$z_2 = G'_0(1) G'_1(1) = \left[\frac{d e^{z(x-1)}}{dx} \right]_{x=1} \times \left[\frac{d e^{z(x-1)}}{dx} \right]_{x=1} = z \times z = z^2 \quad (17)$$

扩展计算第二个邻居数均值的方法, 我们可得第 m 个邻居节点度 (m th neighbors) 均值的计算表达式:

$$z_m = [G'_1(1)]^{m-1} G'_0(1) = \left[\frac{z_2}{z_1} \right]^{m-1} z_1 \quad (18)$$

假设在随机部署的无线传感器网络中, 所有的节点在经过 l 步后都能到达, 我们可得以下公式:

$$1 + \sum_{m=1}^l z_m = N \quad (19)$$

将式(18)代入式(19)可得

$$l = \frac{\ln[(N-1)(z_2 - z_1) + z_1^2] - \ln z_1^2}{\ln(z_2/z_1)} \quad (20)$$

将 $z_1 = z$, $z_2 = z^2$ 代入上式, 我们有

$$l = \frac{\ln N}{\ln z} \quad (21)$$

5 拓扑控制

由式(21)可知, 在网络节点数 N 一定的条件下, 无线传感器网络通信半径 R 的增加将导致节点度的均值 z 的增加, 那么平均路径长度 l 将减少, 此时增加了节点间的通信链路, 加重了网络中信号间的干扰, 破坏了无线传感器网络对通信结构稀疏性的要求. 由于无线传感器网络一般具有较高的节点密度, 我们可在这样高密度部署的网络中, 选取活动节点的工作子集, 使工作集中的节点能满足网络拓扑的连通性, 那么信息就可以在工作节点子集中找出一条路径以多跳的方式传送到基站. 而此时非工作子集中的节点作为冗余节点进入睡眠状态以减少能量的消耗.

为此, 我们将采用平均度约束的方法来限制参与工作的节点数, 并保证网络的连通性.

定理 1. 在无线传感器网络中, 设节点的通信半径为 R_i 、节点的平均度为 z_i 时, 网络连通. 增加节点的通信半径 $R_i \rightarrow R_j$, 则网络节点的平均度为 z_j , 其中 $R_i, R_j \in \left(\sqrt{\frac{A}{(N-1)\pi}}, \sqrt{\frac{A \ln(N)}{(N-1)\pi}} \right)$. 如果此时节点随机选取的邻居数 (工作节点) 等于通信半径为 R_i 时节点的平均度, 即 $z_j = z_i$, 则网络保持连通性不变.

证明. 设通信半径为 R_i , 网络节点数为 N 时, 无线传感器网络节点的平均度由式(5)可得

$$z_i = (N-1) \frac{\pi R_i^2}{A} \quad (22)$$

使 $z_i = (1, \ln(N))$, 设网络连通, 那么, 当通信半径 R_i 增加为 R_j 时, 有 $R_j > R_i$, 此时

$$z_j = (N-1) \frac{\pi R_j^2}{A} \quad (23)$$

必然有 $z_j > z_i$, 那么网络节点冗余度增加. 在节点通信半径 R_j 范围内, 使随机选取的邻居数保持与通信半径 R_i 时节点的平均度相等, $z_j = z_i$, 则网络连通性不变. 证毕.

推论 1. 平均度约束下的无线传感器网络拓扑在保持网络连通性的同时, 工作节点数 N_w 小于网络节点数 N , 即 $N_w < N$.

证明. 在平均度 z_i 约束下, 当 $R_j > R_i$ 时, 尽管无线传感器网络节点邻居数有所增加, 而工作节点平均度保持不变, 即 $z_j = z_i$, 由式(19)可得

$$1 + \sum_{n=1}^l z_n = N_w \quad (24)$$

式中 N_w 为平均度约束下网络的工作节点数. 由于 $z_n < z_m$, 因此有

$$\sum_{n=1}^l z_n < \sum_{m=1}^l z_m \tag{25}$$

与式(19)比较可得

$$N_w < N \tag{26}$$

证毕.

6 仿真与讨论

借助于图形化工具^[12], 无线传感器网络节点的通信半径为 $R=45\text{m}$ 和 $R=80\text{m}$ 时, 可得出图 2 和图 3. 从这些图上我们可以清楚地看到, 当 $R=45\text{m}$ 时, 网络节点的邻居数减少, 网络中孤立节点数增加, 从而使网络的连通性受到极大影响. 增加通信半径, $R=80\text{m}$ 时, 网络中节点度明显增加, 孤立节点消失, 网络保持连通性. 但显而易见, 此时参与工作节点数和网络中节点间的信息交互的活跃程度大大增加, 某些节点因持续工作而过早死亡. 通过平均度约束的无线传感器网络拓扑控制, 可使网络中节点能耗均匀分布, 提高拓扑控制和覆盖的质量, 使形成的覆盖区域避免出现多重的重叠, 减少选出的工作节点数量, 以避免造成额外的资源消耗.

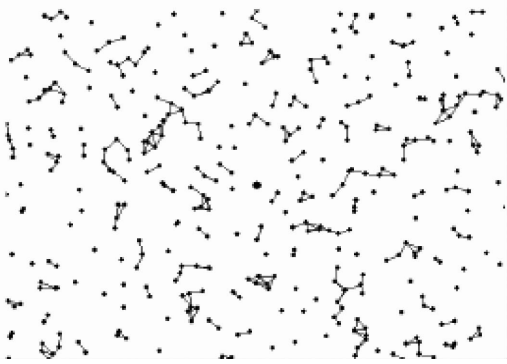


图 2 $R=45\text{m}, N=400$ 时, 图形化网络连通图

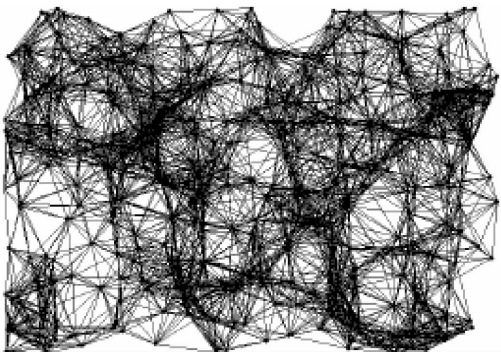


图 3 $R=80\text{m}, N=400$ 时, 图形化网络连通图

图 4 表明了在不同的通信半径 R 下, 无线传感器网络节点的平均度 z 与网络节点数 N 之间的关系. 在节点平均度约束下, 通信半径 R 的增加, 可以减少网络的工作节点数, 比如在区域 $A=200 \times 200\text{m}^2$ 范围内, 当平均度 $z=16$, 节点的通信半径为 $R=5\text{m}$ 时, 网络的节点数 $N=8000$ 个, 当 $R=10\text{m}$ 时, 网络的节点数 $N=2000$ 个, 而取 $R=15\text{m}$ 时, 网络的节点数可降低到 $N=1000$ 个.

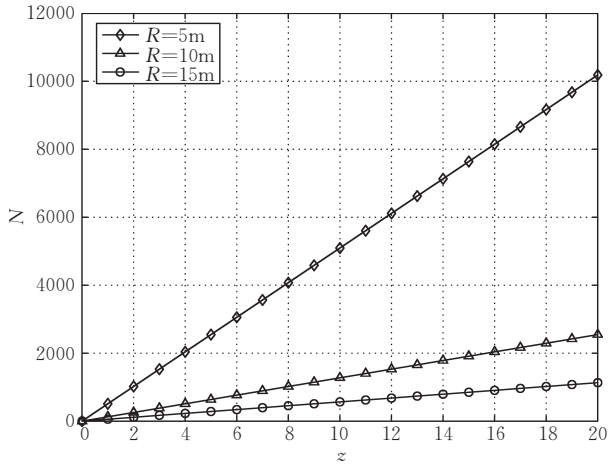


图 4 节点平均度 z 和网络节点数 N 之间的关系

图 5 表明: 在部署区域 A 内, 在相同通信半径 R 的条件下, 网络节点数 N 的增加, 将使节点的平均度 z 增加, 平均度约束的网络拓扑控制就是在网络节点数 N 不变的情况下, 增加通信半径 R , 而保持节点的邻居数不变, 以减少网络的工作节点数, 而保持网络的连通性. 比如, 当 $N=1000$ 个, $R=14\text{m}$ 时, $z_i=15$, 设 $z_i=15 > 1$, 网络连通, 我们增加通信半径, 使 $R=18\text{m}$, 从图中可得, 此时网络节点的平均度 $z_j=25$, 约束工作节点的个数, 使 $z_j=z_i=15$, 根据定理可知, 网络连通性不变, 但网络节点数可减少至 600 个.

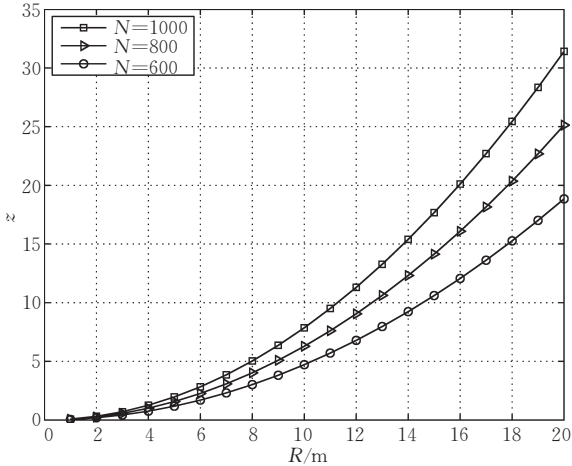


图 5 通信半径 R 和节点平均度 z 之间的关系

7 结 论

借助于随机图理论,对目前已有的网络拓扑控制和连通性算法进行了分析比较,提出了一种全新的平均度约束的无线传感器网络拓扑控制方法.通过理论分析得出了节点度的均值与无线传感器网络连通性之间的关系,确定了在保证网络连通性的条件下,传感器节点通信半径 R 的取值范围.解决了文献[3-7]中网络连通性和网络拓扑稀疏性之间的矛盾,减少了选出的工作节点数量,简化了网络通信结构的复杂性,降低了计算路由对节点资源的消耗,从而延长了网络的生存周期.

参 考 文 献

- [1] Estrin D, Girod L, Pottie G, Srivastava M. Instrumenting the world with wireless sensor networks//Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP2001). Salt Lake City, Utah, 2001
- [2] Pottie G J, Kaiser W J. Wireless integrated network sensors. Communications of the ACM, 2000, 43(5): 51-58
- [3] Ramanathan R, Rosales-Hain R. Topology control of multi-hop wireless networks using transmit power adjustment//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2000. Tel Aviv, Israel, 2000: 404-413

- [4] Liu Ji-Lei, Li Bao-Chun. Distributed topology control in wireless sensor networks with asymmetric links//Proceedings of the IEEE Globecom 2003, Wireless Communications Symposium. San Francisco, CA, 2003: 1257-1262
- [5] Li Ning, Hou Jennifer C. Topology control in heterogeneous wireless networks: Problems and solutions//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2004. Hong Kong, China, 2004
- [6] Zhang H, Hou J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. Technical Report UIUC: UIUCDCS-R2003-2351, 2003
- [7] Xue Feng, Kumar P R. The number of neighbors needed for connectivity of wireless networks. Wireless Networks, 2004, 10(2): 169-181
- [8] Newman M E J, Strogatz S H, Watts D J. Random graphs with arbitrary degree distributions and their applications. Physics Reviews E, 2001, 64(2): 26-118
- [9] Newman M E J. Random graphs as models of networks//Bornholdt S, Schuster H G eds. Handbook of Graphs and Networks. Berlin: Wiley-VCH, 2003: 35-68
- [10] Albert Réka, Barabási Albert-László. Statistical mechanics of complex networks. Reviews of Modern Physics, 2002, 74(1): 47-97
- [11] Newman M E J. The structure and function of complex networks. SIAM Review, 2003, 45(2): 167-256
- [12] Dowell L Jonathan, Michael Lee Bruno. Connectivity of random graphs and mobile networks: Validation of Monte Carlo simulation results//Proceedings of the 2001 ACM Symposium on Applied Computing. Las Vegas, Nevada, United States, 2001: 77-81



CHEN Li-Jun, born in 1961, professor. His research interests include distributed computing and wireless sensor networks.

MAO Ying-Chi, born in 1976, Ph. D. candidate. Her

research interests include distributed computing and wireless sensor networks.

CHEN Dao-Xu, born in 1947, professor and Ph. D. supervisor. His research interests include distributed computing and pervasive computing.

XIE Li, born in 1942, professor and Ph. D. supervisor. His research interests include distributed computing and network security.

Background

Wireless sensor networks have attracted a great deal of research attention due to their wide range of potential application. Topology control is one of the most important techniques in wireless sensor networks. If the topology is too sparse, there is a danger of network partitioning and high end-to-end delays. On the other hand, if the topology is too dense, the limited spatial reuse reduces network capacity. Wireless sensor networks that do not employ topology control are likely to result in degraded performance, or even dis-

rupted connectivity.

The specific problem we consider has not studied previously. Many researchers addressed topology control with the approach of using transmitting power adjustment. The idea is to adjust node transmit power in response to topological changes and attempt to maintain a connected topology. Although the solution can show that reachability between any two nodes is guaranteed to be the same as the maximum topology and nodal transmission range is minimized to cover the

least number of surrounding nodes. However, they do not consider any techniques for actually controlling the sparseness of topology of networks, nor do they concern themselves with connectivity.

This paper presents the topology control of wireless sensor networks under an average degree constraint. With increasing communication radius and constraining node degree, the inconsistency of network topology connectivity and sparseness can be solved.

This work was supported in part by the National Natural Science Foundation of China under grant No. 60573132. The project title is "Topology Control Based on the Theory of Complex Networks in Wireless Sensor Networks".

Complex networks are currently being studied across many fields of science, the discovery of small world and scale free properties of many natural and artificial complex networks has stimulated a great deal of interest in studying the underlying principles of various complex networks, which

has led to dramatic advances in this emerging and active field of research. The ubiquity of complex networks in science and technology has naturally led to a set of common and important research problems concerning how the network structure facilitates and constrains the network dynamical behaviors, which have largely been neglected in the studies of traditional disciplines.

It is possible to derive models of wireless sensor networks based on the theory of complex networks to develop specifications for node density, network connectivity and fault-tolerant communication topologies of such networks. The paper "Evolution of Wireless Sensor Networks" has been published by IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2007 — Networking (WCNC 2007). In that paper, the authors propose a simple evolving mechanism to deduce fault tolerant communication topology among the cluster heads. They investigated the relationship between communication connectivity and topology sparseness.