

新颖的无线传感器网络组网算法^①

余根坚

¹(闽江学院 计算机科学系, 福州 350108)

²(富春通信股份有限公司 通信技术研究院, 福州 350003)

摘要: 为有效解决无线传感器网络的网络维护困难性问题, 研究性能更好的网络组网算法是一种有效的解决手段. 本文给出了无线传感器网络体系结构模型及其连通性定义, 在此基础上本文提出了一个具有网络连通性能好的无线传感器网络组网算法并进行了仿真分析, 由该算法构成的无线传感器网络不仅具有连通性能好, 而且具有保护网络节点能量和控制网络功率的优良特点, 所以在传感器网络实际应用中有着光明的前景.

关键词: 无线传感器网络; 组网算法; 节能; 功率控制; 仿真

Novel Networking Algorithm for Wireless Sensor Networks

YU Gen-Jian

¹(Department of Computer Science, Minjiang University, Fuzhou 350108, China)

²(Institute of Communications, Fuchun Communications Co.,Ltd, Fuzhou 350003, China)

Abstract: In order to effectively solve the wireless sensor network maintenance difficult problem, networking algorithm with better performance is an effective method to solve the problem. The paper presents the architecture of wireless sensor network model and its connectivity is defined, then the paper presents a networking algorithm for wireless sensor networks with good connectivity, and the algorithm is analyzed by simulations. The wireless sensor network that constructed by our algorithm not only has good connectivity performance, but also can protect energy of network nodes and control network power, so it has a bright application prospect.

Key words: wireless sensor networks; networking algorithm; saving energy; power control; simulation

常见的无线网络通常是以蜂窝网络或无线局域网等形式出现的. 在蜂窝网络中, 无线终端之间的通信必须借助于基站和(或)移动交换机的转接完成; 在无线局域网中, 无线终端通过无线接入点连接到现有的固定网络. 与此同时, 家庭无线网、车载无线网等无线通信新技术也纷纷涌现, 这些无线网络和无线通信技术是对固定有线通信网络的补充和发展, 它们需要固定基础设施的支持, 并且一般采用集中式的控制方式. 但在某些特殊环境或紧急情况下, 有中心的无线通信技术并不能胜任. 比如, 战场上部队快速展开和推进发生地震等自然灾害后的搜索和营救、野外科学考查等. 在以上场合中需要一种不依赖基础设施能够快速和灵活配置的无线通信网络技术, 无线传感器网络就满足这种

应用需求, 它是一种由若干无线通信设备组合而成的一种分布式无线分组网络, 网络中的节点既是终端又是路由器, 不在彼此覆盖范围内的无线节点之间的通信可经中间节点的转发来完成. 同其他类型的无线网络(如蜂窝无线网络、卫星通信网络等)相比, 无线传感器网络的显著特点是它不需要固定通讯设备(如基站)的支持^[1], 无线传感器网络不依赖于一个固定的网络节点, 它能随着节点的加入、离开, 实现节点的移动自组织、自管理. 因此, 无线传感器网络具有组网灵活、分布实施、抗毁能力强、可快速组网等特点, 可作为野战通信、公共安全、灾后紧急救援、临时会议会场等的通信网络, 也可作为已有的有线和无线网络的多跳扩展. 因此无线传感器网络具有广阔的应用前景, 已成为国

^① 收稿时间:2013-07-11;收到修改稿时间:2013-08-19

内外的一个研究热点^[1-6]. 目前无线传感器网络关键技术的研究主要集中于无线传感器网络的 QoS(Quality of Service)体系结构、MAC(Medium Access Control)机制、路由协议、安全问题^[1,2]等. 由于无线传感器网络自身的特点, 以及环境影响和节点能量的电池供应等因素, 使得网络节点更容易出现故障, 这是因为环境干扰和节点故障易造成网络拓扑结构的变化. 由于无线信道的复杂物理特征、信道的功率分配、节点位置、信息流量的数学处理等, 使得无线传感器的两个基础特性, 即连通性和网络性能的研究, 具有很大的挑战性和现实意义, 近年来得到了研究者的极大关注^[7-12], 无线传感器网络节点体积微小, 通常携带能量十分有限的电池, 这种特征决定了需要对无线传感器网络的节点功率、协议复杂性进行控制以及要求收发机结构复杂性不能太高等. 网络连通性研究的一个重要方面就是传输距离和连通性之间的关系研究, 因为在网络连通性和功率消耗、干扰、网络吞吐量性能之间存在着相互制约关系.

近年来关于无线网络连通性的一个主要工作是在随机图论^[13]的基础上, 通过所提出的信干比图(Signal to Interference Ratio Graph)^[8]来研究具有恒定节点密度的大规模无线传感器网络的连通性能. 文献^[14]的主要结论是, 在一定的模型假设条件下, 对于存在节点间干扰的传感器网络, 其连通性能可以由网络规模来很好地刻画. 对于具有恒定节点密度的大规模无线传感器网络, 其连通性问题是和渗透理论相关联^[15].

无线传感器网络的研究主要集中于路由协议、MAC 协议、拓扑控制、IEEE 802.15.4 标准、定位技术、时间同步、安全技术、数据管理和融合等, 而专门针对无线传感器网络来研究和构造网络连通性能优良的无线传感器网络的文献极少, 本文就来研究这个问题, 并且本文提出了一个具有优良连通性能的无线传感器网络组网算法, 并进行了仿真研究.

1 无线传感器网络体系结构模型

一个典型的无线传感器网络结构如图 1 所示. 传感器网络系统通常包括普通节点、汇聚节点和管理节点, 大量的无线传感器普通节点部署在监测区域内部或附近, 能够通过自组织方式构成网络. 无线传感器节点监测的数据沿着其他传感器节点逐跳地进行传输, 在传输过程中监测数据可能被多个节点处理, 经过多跳传输后达到汇聚节点, 最后通过卫星和互联网到达

管理节点, 用户只要通过管理节点对无线传感器网络进行配置和管理, 进而发布监测任务或收集监测数据.

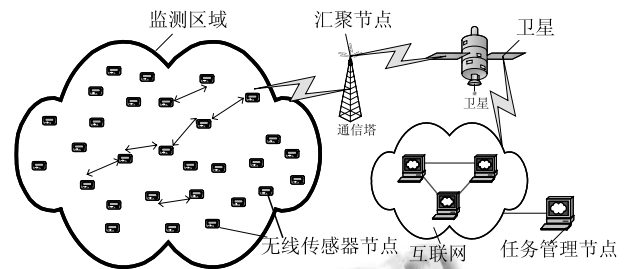


图 1 无线传感器网络体系结构模型

本文所研究的无线传感器主要位于监测区域内, 并且假设如图 1 所示的监测区域内的无线传感器网络由 N 个传感器节点 $\mathcal{R} = \{1, 2, \dots, N\}$ 构成, 且监测区域近似看成一个大半径为 R 的圆周, 传感器节点随机分布于监测区域内, d_{ij} 表示节点 i, j 之间的距离, 传感器节点的信息通信半径为 r , 则当 $d_{ij} \leq r$ 时, 传感器节点 i, j 之间可以相互通信, 此时称 i, j 之间存在一条边, 假定上述无

线传感器中存在 L 条边, 则有: $0 \leq L \leq \frac{N(N-1)}{2}$, 当第二个不等式中的等号成立时, 此时的无线传感器网络称为全连通无线传感器网络或网状无线传感器网络(Mesh 无线传感器网络). 在监测区域内的传感器节点密度为 $\eta = N/\pi R^2$, 而边密度我们定义为 $\lambda = L/N$. 本文主要考虑具有恒定节点密度 η_0 的无线传感器网络.

2 无线传感器网络的连通性质定义

不象有线网络已经具备固定的节点通信数据连接线, 无线传感器网络的无线链路是选择具有一定功率水平的无线节点, 通过发射信息包而形成的, 对于任一个传感器节点 i , $1 \leq i \leq N$, 定义集合:

$$M_i = \{k \mid d_{ik} \leq r, k \neq i, 1 \leq k \leq N\} \quad (1)$$

则 M_i 表示能与 i 直接通信(单跳)的传感器节点集合, 令 $\langle i \rangle = |M_i|$, 其中 $| \cdot |$ 表示集合的元素个数, 我们称 $\langle i \rangle$ 为传感器节点 i 的节点度, 整个无线传感器网络的平均节点度记为 $\bar{E}_N = \frac{\sum_{i=1}^N \langle i \rangle}{N}$, 由于无线传感器网络中

每条边都连着两个传感器节点, 所以易见

$$\bar{E}_N = 2\lambda = 2L/N \quad (2)$$

这时把上述的无线传感器网络记为 $\Omega(\mathcal{R}, \bar{E}_N)$, 无

线传感器网络的连通性质定义如下:

定义 1: 称 $\Omega(\mathfrak{R}, \bar{E}_N)$ 为信息可达的, 如果网络中任一传感器节点通过单跳或多跳路由均可和无线传感器网络中的其他节点进行信息交换.

定义 2: 称 $\Omega(\mathfrak{R}, \bar{E}_N)$ 为连通性强的, 当且仅当存在一个正常数 $c > 0$, 使得下式成立

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \Pr \{ \Omega(\mathfrak{R}, c(\log N - 1)) \text{ 为信息可达的} \} = 1 \quad (3)$$

3 新的无线传感器网络组网算法

上述已经指出, 无线传感器网络中的节点是随机分布于一个大的半径为 R 的圆周监测区域内, 那么任意两个传感器节点 i, j 之间的距离 d_{ij} 就是一随机变量, 其概率密度函数可表示如下^[16]:

$$f(d_{ij}) = \frac{2d_{ij}}{R^2} \left(1 - d_{ij} \sqrt{4R^2 - d_{ij}^2} / 2\pi R^2 - 2 \arcsin(d_{ij}/2R) / \pi \right) \quad (4)$$

则

$$\Pr \{ d_{ij} \leq r \} = \int_0^r f(d_{ij}) d(d_{ij}) = \left(\frac{r}{R} \right)^2 + \frac{2}{\pi} \left(\left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \varphi + \frac{\sin(4\varphi)}{4} - \sin(2\varphi) \right) \quad (5)$$

其中 $\varphi = \arcsin(r/2R)$, 由于 $\eta_0 = N/\pi R^2$, 所以无线传感器网络中存在的单跳边数的期望为:

$$E(L) = \binom{N}{2} \Pr \{ d_{ij} \leq r \} = \frac{\eta_0 \pi R^2 (\eta_0 \pi R^2 - 1)}{2} \Pr \{ d_{ij} \leq r \} \quad (6)$$

由(2)知, 无线传感器网络的平均节点度为:

$$\bar{E}_N = \frac{\eta_0 \pi R^2 - 1}{2} \Pr \{ d_{ij} \leq r \} \quad (7)$$

另外, 功率控制对于无线传感器网络来说很重要, 所以在考虑网络连通性的同时, 必须注意节约传感器节点能量, 这意味着要用最少的苏醒传感器节点相互连接而构成连通性强的无线传感器网络, 也就是说要尽可能少地唤醒睡眠着的传感器节点, 以延长无线传感器网络生命.

假定无线传感器网络中在 t_0 时刻苏醒着的传感器节点集合为 \mathfrak{R}_w 、节点数为 N_w , 该时刻睡眠节点集合为 \mathfrak{R}_s 、节点数为 $N_s = N - N_w$. 无线传感器网络组网

算法如下:

- 1) 初始化 N, R, r 以及允许限 ε_0 (正实数).
- 2) 对于 $\forall j \in \mathfrak{R}_w, j$ 发送一个单跳广播请求到 M_j 中的各个节点, M_j 中的各个节点各反馈一个 ID 分组信息包, 该信息包中包含的信息有: 反馈节点 ID 标识、状态(苏醒或睡眠).
- 3) 若 $M_j \cap \mathfrak{R}_s \neq \emptyset, |M_j \cap \mathfrak{R}_w| < \varepsilon_0 \log N$, 则节点 j 发出唤醒请求给 $M_j \cap \mathfrak{R}_s$ 中任一传感器节点, 唤醒等待时间为 Δt , 转 4); 若 $M_j \cap \mathfrak{R}_s \neq \emptyset$, 而 $|M_j \cap \mathfrak{R}_w| \geq \varepsilon_0 \log N$, 或 $M_j \cap \mathfrak{R}_s = \emptyset$ 时, 均转 2) 重新选定 j .
- 4) 利用 (5)、(7) 计算 \bar{E}_N , 若 $\bar{E}_N = \Theta(\log N)$ (Θ 表示同阶), 则说明此时无线传感器网络的网络连通性强是一种大概率事件, 算法结束; 否则, 转 5).
- 5) $t_0 = t_0 + \Delta t$, 并更新 $\mathfrak{R}_w, \mathfrak{R}_s$, 转 2).

本组网算法在达到大概率连通性强和连通性能好的目的之后, 即停止睡眠传感器节点的唤醒操作, 从而最大限度地节省了传感器节点的电池能量, 延长了整个无线传感器网络的网络生存时间.

4 仿真

仿真参数 $\eta_0 = 4.25 \times 10^{-4}$, 即在半径为 750 m 的无线传感器网络监测区域内大概分布有 750 个传感器节点. 由算法所产生的无线传感器网络节点度变化情况如图 2 所示, 在算法第一步初始化 N, R, r 以及允许限 ε_0 (正实数) 时, 是基于无线传感器网络实际背景的, 所以将 R, r 的取值范围分别设定为 $500 \leq R \leq 1000, 1 \leq r \leq 4, \varepsilon_0 = 0.05$. 其中 $\varepsilon_0 = 0.05$ 是为了保证无线传感器网络将以 95% 的概率是连通性强的.

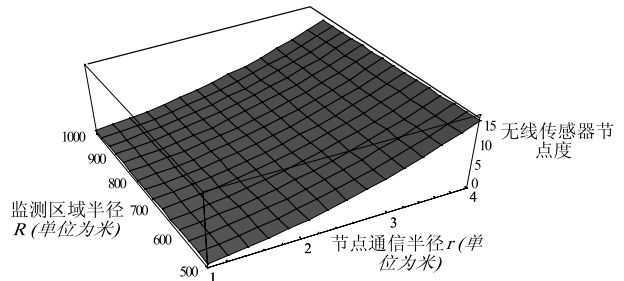


图 2 网络平均节点度随节点通信半径和监测区域半径的变化情况

文献[11]从数学理论上严格证明了当时, (3)式成

立, 即这时无线传感器网络在理论上为完全连通的无线传感器网络. 本文组网算法所构造的无线传感器网络则为大概率连通性能好的, 能在一定程度上保证连通性能好. 从仿真过程可以发现, 服从本文组网算法的无线传感器网络的节点度概率分布是近似的一个正态分布, 如图 3 所示, 无线传感器网络节点度约为 10 附近的概率均超过了 95%, 而由 $R=750$ 、 900 、 600 , 以及 $c=5.1774$ 和(3)式可得: 使得无线传感器网络为完全连通的网络平均节点度大约分别为 9.20、10.53、8.71, 即完全连通的无线传感器网络平均节点度也基本上在 10 附近变化, 和本文的算法仿真相吻合.

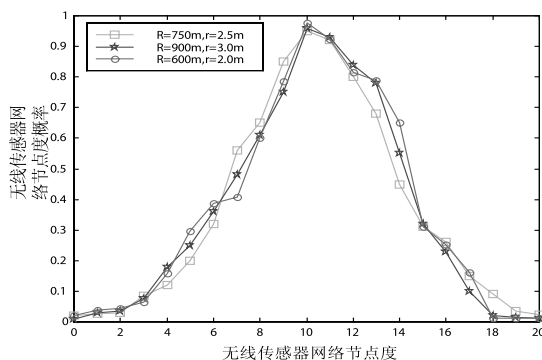


图 3 算法产生的网络节点度概率分布

5 结论

无线传感器网络特别适合于部署在恶劣环境或人类不宜到达的区域, 传感器节点往往采用随机部署, 如通过飞机撒播或发射炮弹到指定区域进行部署, 这些都意味着无线传感器网络的网络维护十分困难甚至不可维护, 所以无线传感器网络的软硬件必须具备鲁棒性、抗毁性和容错性. 本文提出了一个具有连通性能好的无线传感器网络组网算法并进行了仿真分析, 该组网算法不仅具备无线传感器网络所要求的连通性能好, 以及具备一定的鲁棒性和抗毁性, 而且也兼顾到传感器节点的能量保护和网络功率控制, 因而在实际应用中有着光明的前景.

参考文献

- Freris NM, Kowshik H, Kumar PR. Fundamentals of large sensor networks: Connectivity, capacity, clocks, and computation. *Proc. of the IEEE*, 2010, 98(11): 1828–1846.
- Sun Z, Akyildiz IF, Hancke GP. Dynamic connectivity in wireless underground sensor networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2011, 10(12): 4334–4344.
- Han XF, Lloyd EL, Shen CC. Fault-tolerant relay node placement in heterogeneous wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2010, 9(5): 643–656.
- Jiong J, Sridharan A., Krishnamachari B. et al. Handling inelastic traffic in wireless sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28(7): 1105–1115.
- Mascarenas D, Flynn E, Farrar C. A mobile host approach for wireless powering and interrogation of structural monitoring sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(12): 1719–1726.
- Tsun CC, Tse CK. A delay-aware data collection network structure for wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(3): 699–710.
- Dousse O, Thiran P, Hasler M. Connectivity in ad-hoc and hybrid networks. *IEEE Journal*, 2002, 20(7): 223–230.
- Gupta P, Kumar PR. The capacity of wireless networks. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2000, 46(2): 388–404.
- Lee E, Park S, Fucui Yu, et al. Communication model and protocol based on multiple static sinks for supporting mobile users in wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, 2010, 56(3): 1652–1660.
- Wei YC. A unified analytic framework based on minimum scan statistics for wireless ad hoc and sensor networks. *IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, 2009, 20(9): 1233–1245.
- Xue F, Kumar P. The number of neighbors needed for connectivity of wireless networks. *Wireless Networks*, 2004, 10(2): 201–210.
- Ammari HM, Das SK. A study of k-coverage and measures of connectivity in 3D wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Computers*, 2010, 59(2): 243–257.
- Bollobás B. *Random Graphs*. London, Cambridge, 2001: 78–151.
- Rajagopalan R., Varshney P. Connectivity analysis of wireless sensor networks with regular topologies in the presence of channel fading. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2009, 8(7): 3475–3483.
- Lee JH, Kwon T, Song JS. Group connectivity model for industrial wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2010, 57(5): 1835–1844.
- Bereketli A, Akan OB. Communication coverage in wireless passive sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 2009, 13(2): 133–135.