

基于 Delaunay 的无线传感器网络模型生成算法^①

吴华瑞^{②*} 高荣华^{③*} 尹长川^{***}

(* 国家农业信息化工程技术研究中心 北京 100097)

(** 农业部农业信息技术重点开放实验室 北京 100097)

(*** 北京邮电大学电子工程学院 北京 100876)

摘 要 为优化自组织无线传感器网络拓扑结构和提高网络总体性能,根据无线传感器网络节点的三角剖分特性,提出了一种基于 Delaunay 的无线传感器网络拓扑结构生成算法,详细给出了信息节点与能量节点在网络体系中的工作机制与轮换机制。仿真实验分析表明,用上述算法生成的 Delaunay 无线传感器网络体系适合于复杂环境下的散乱节点通信与数据采集,在覆盖度最大的前提下,该网络拓扑结构与星型网、网状网与传统混合网络拓扑结构相比,网络稳定性较强,在相同区域、节点条件下,网络开销最小,生存周期最长。

关键词 无线传感器网络, Delaunay, 三角剖分, 拓扑结构, 路由协议

0 引 言

无线传感器网络是由部署在监测区域内大量廉价微型传感器节点组成,通过无线通信方式形成的一个多跳自组织网络系统,其目的是协作感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息,并发送给观察者,从而实现物理世界、计算世界以及人类社会之间的相互联通^[1]。无线传感器网络在基础理论与工程技术两个层面上的许多研究课题都具挑战性^[2-5],网络模型优化是其中之一。网络模型组织结构的好坏直接影响到网络总体开销、生存时间、节点间通信干扰、节点能量消耗等,因此依据不同应用场景与用户需求,优化网络模型是至关重要的问题。

无线传感器网络可分为星型网、网状网、混合网。星型网是网络拓扑结构整体功耗比较低的单跳系统,节点与基站双向通信,传输距离有限,网络结构简单。为保证每个节点都正确接收数据,节点必须以大功率发送数据,而节点自身能量有限,使得整体网络能量快速耗尽,同时,节点距离较近,会导致不必要的相似或相同冗余信息,从而增加网络负载。

网状网是一个节点相同、直接互相通信的多跳系统,与基站进行数据传输和相互传输命令^[6]。拓扑结构中每个节点都有多条路径到达网关或其他节点,其容错能力较强。当某节点失效时,其余节点能自行组成新网络,但节点不间断地“监听”网络中目标节点信息及网络拓扑变化,导致网络能量损耗增加,网络寿命缩短。混合型网络拓扑结构兼具星型网的简洁、易控与网状网的多跳、容错能力强等优点,传感器节点通过由基站指定或自组织方法形成各个独立的簇,每个簇选出相应的簇首,由簇首负责簇内节点的控制,并对簇内所收集的数据进行整合、处理,随后转发给基站^[7]。混合型网络中簇首的选取决定着整个网络的优劣,而目前簇首的选取大多数通过人工主观选择,误差性比较大。低能耗自适应分簇分层(LEACH)^[8]通过周期性轮转产生簇头,使得簇头位于本簇边界上时,收集到数据耗能较高。基于质心的成簇算法 CDCS^[9]在 LEACH 基础上重新选择簇质心作为簇头,降低簇内通信总能耗,但没有充分利用第一次选出的簇头。本文提出一种基于 Delaunay 的无线传感器网络拓扑结构生成算法,将传感器节点通过自组织方法形成若干 Delaunay 独

① 国家自然科学基金(61271257, 61102126), 核高基重大专项(2010ZX01045-001-004), 国家科技支撑计划(2011BAD21B02)和北京市自然科学基金(4122034)资助项目。

② 男,1975 年生,研究员;研究方向:无线传感器网络;E-mail: wuhr@nercita.org.cn

③ 通讯作者,E-mail: gaorh@nercita.org.cn
(收稿日期:2011-11-10)

立簇,每个簇均存在接收子节点传递过来的信息与能量状态的两个功能节点,仿真实验证明, Delaunay 网络拓扑结构具有较好的稳定性与覆盖性,在高效使用网络能量的基础上,具有最小开销,延长网络生存时间。

1 Delaunay 网络模型

1.1 Delaunay 定义

定义 1 Delaunay 三角剖分^[10]。设 V 是二维实数域上的有限点集,边 e 是由点集中的点作为端点构成的封闭线段, E 是 e 的集合,那么该点集 V 的一个三角剖分 $T = (V, E)$ 是一个平面图 G ,该平面图满足以下条件:(1)除端点外,平面图 G 中的边不包含点集中的任意点;(2)平面图 G 中的边互不相交;(3)平面图中所有的面都是三角形面片,且所有的三角形面片的合集是有限点集 V 的凸包。

设 E 中的一条两个端点是 a, b 的边 e ,当 e 满足下列条件时,称之为 Delaunay 边:存在一个经过 a, b 两点的圆,圆内不含点集 V 中任何其他的点。Delaunay 三角剖分所有边均是 Delaunay 边,是二维平面内的最优三角剖分,具有三角形各边皆不相交、网络具有唯一性、局部稳定性等特点^[8]。

1.2 Delaunay 网

假设随机散落在检测区域中的传感器节点,任意三个均不在一条直线上,则存在散乱点集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, $s_i \neq s_j$, $1 \leq i, j \leq n$, $i \neq j$ 。分别求取 s_i, s_j 的最近点 $D_{\min}^{hi} = \min(\text{dis}(s_k, s_i))$ 和 $D_{\min}^{hj} = \min(\text{dis}(s_k, s_j))$,若 $D_{\min}^{hi} \leq D_{\min}^{hj}$,则选取 s_k 与 s_i, s_j 构成三角形,此时三条边 $\overline{s_i s_j}, \overline{s_j s_k}, \overline{s_k s_i}$ 的权值 $\omega_{ij}, \omega_{jk}, \omega_{ki}$ 分别赋值为 1。继续求取 s_i, s_j, s_k 的最近点,设为 s'_i, s'_j, s'_k ,则生成新的边 $\overline{s_i s'_i}, \overline{s'_i s'_j}, \overline{s'_j s'_k}, \overline{s'_k s'_i}, \overline{s'_i s'_j}, \overline{s'_j s'_i}, \overline{s'_j s'_k}, \overline{s'_k s'_j}, \overline{s'_k s'_i}, \overline{s'_i s'_k}$,此时新产生边的权值赋值为 1,而原始三角形三条边的权值 $\omega_{ij}, \omega_{jk}, \omega_{ki}$ 加 1,如图 1 所示。依次类推,不断寻找权值为 1 的边的两个顶点的最近点,添加新边后,权值为 1 的边加 1,直到权值为 1 的边遍历不到最近点为止,将未封闭的点

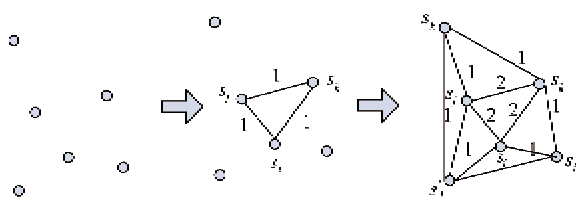


图 1 Delaunay 网生成

连接构成三角形,从而所有的无线传感器节点均被连接而成为一个三角形网络,此时的三角形边均不相交,满足 Delaunay 三角特性,称为 Delaunay 网。

2 基于 Delaunay 的无线传感器网络拓扑生成

定义 2 信息节点。用于收集各个子节点监测得到信息的节点,称为信息节点,其内部结构如图 2 所示。

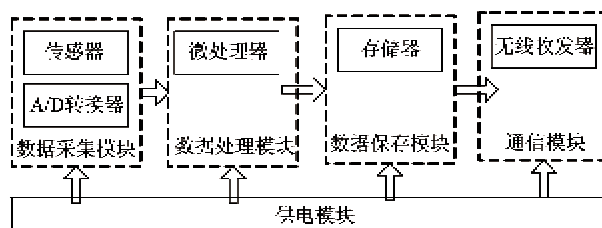


图 2 信息节点基本结构

信息节点通过传感器与 A/D 转换器,采集簇内所有子节点信息,经过数据预处理模块,将所有数据汇总保存到存储器中,通过通信模块随时传递给簇首节点。

定义 3 能量节点。用于实时监测各子节点电池能量强弱的节点,称为能量节点,其内部结构如图 3 所示。

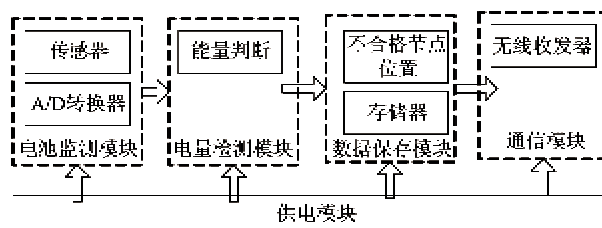


图 3 能量节点基本结构

能量节点通过监测模块,监测节点中的电池能量,规定阈值 ε ,当簇内子节点电池能量小于 ε 时,将当前节点的位置保存到存储器内,并通过通信模块将此能量将近耗尽的节点位置反馈给簇首节点,再由簇首向总基站发出警告,方便用户及时更换电池或增减节点调整网络,以保证整个网络生命的健壮。能量节点与信息节点统称为功能节点。

构建 Delaunay 簇网络过程中,记录簇网络边界的最长边与簇内最短边(分别记作 $l_{\max}, l_{\min}$),将信息节点与能量节点置于 $l_{\max}$ 外侧,两个节点之间的

距离不超过 $l_{\max}$, 与边 $l_{\max}$ 的距离均为 $l_{\min}$, $l_{\max}$ 边的两个端点分别连接信息节点与能量节点。同理, 设定簇首距离两功能节点所在边的距离为 $l_{\min}$, (如图 4), 形成一个封闭的 Delaunay 簇。

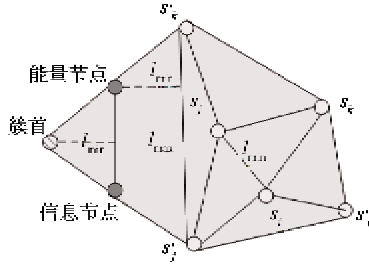


图 4 Delaunay 簇

此时, Delaunay 簇的每条边均是两个最近点构成的最短距离, 因此网络拓扑的总长为最短, 且 Delaunay 三角网格相对其他多边形结构, 具有很强的稳定性, 能够保证网络的有效生命周期, 兼顾了网络的覆盖性与稳定性特性。当簇内某个节点被删除时, 此时假设点 s_i 被删除, 仅判断 s_i 周围的中断边, 将其重新连接成新的边, 如图 5, s_j 与 s'_i 之间的网络中断, 此时其余网络拓扑结构不变, 直接连接点 s_j 与点 s'_i 重新构成新的网络拓扑结构。

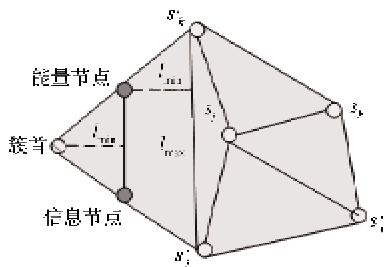


图 5 节点删除后的 Delaunay 簇

同理, 信息节点或能量节点因为电池能量中断而消失时, 迅速查找距离簇头最近的一个节点替代信息节点或能量节点, 以维持整个网络的畅通, 因此 Delaunay 簇可根据节点的增加与删除动态生成新的网络拓扑结构, 同时具有 Delaunay 网格特性, 最近点的链接使得整个网络拓扑结构的距离为最短, 从而节约了网络构建的成本。将所有的簇首与基站连接, 形成基于 Delaunay 的无线传感器网络拓扑结构, 如图 6 所示。

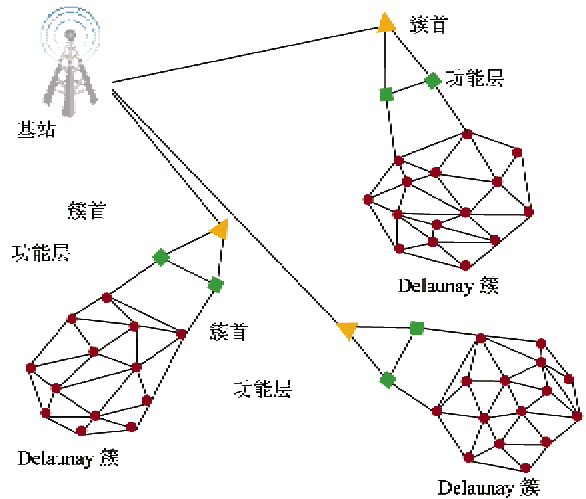


图 6 基于 Delaunay 的无线传感器网络拓扑结构

3 基于 Delaunay 的网络拓扑结构的优势

基于 Delaunay 的无线传感器网络拓扑结构, 簇首通过功能层与 Delaunay 簇关联, 基站和簇首构成星型网络拓扑结构。Delaunay 三角形特性决定了基于 Delaunay 的网络拓扑结构的优势, 满足了无线传感器网络拓扑结构的构建目标。以最近邻的三角形构成的三角形网, 保证了无线传感器网络构建的合理性与最优性, 同时网络中的各个边互不相交, 避免节点之间重复连接而导致的无线传感器网络资源浪费。而且最短距离的 Delaunay 网络拓扑结构具有“唯一性”, 这样可以方便网络的管理与网络的可控性。Delaunay 网络是一个最规则、最优的三角形网络, 从而节省了设计资源。

当网络中的某一节点能量消失时, 无线传感器网络拓扑结构发生相应的改变, 如图 7, 当黑色方形节点被删除后, Delaunay 网络拓扑结构变化的仅仅是黑色方形节点周围区域, 并没有影响到其他节点的拓扑结构, 从而 Delaunay 网络拓扑具有很好的稳定性, 既节省资源, 又不会导致整个网络瘫痪。

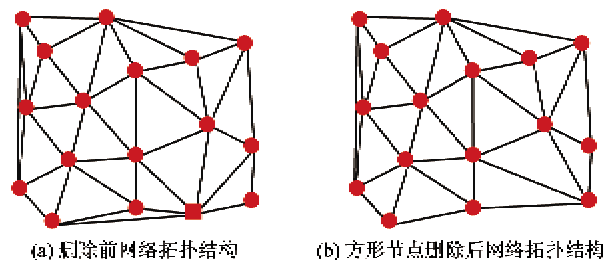


图 7 节点删除后 Delaunay 网络拓扑结构对比

4 仿真分析

为了验证基于 Delaunay 的无线传感器网络拓扑结构,利用 VC++ 语言构建无线传感器节点的 Delaunay 网络拓扑结构,并在 OPNET 仿真环境对其

进行仿真实验分析。首先,设置网络仿真环境,在 $180\text{m} \times 230\text{m}$ 的网络范围内,随机分布 108 个无线传感器节点,仿真过程按照区域将无线传感器节点分割为 4 部分,每一部分子节点群用 Delaunay 簇相互连接,如图 8 所示。

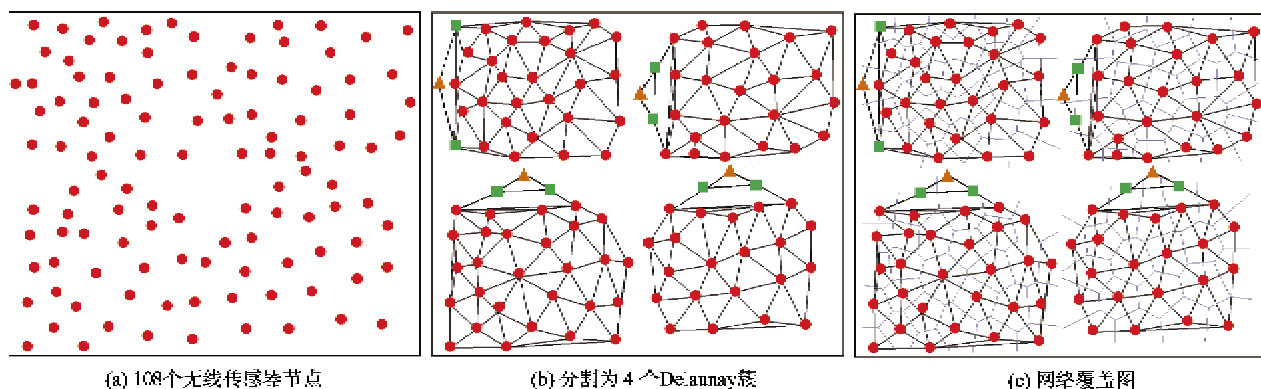


图8 仿真实验分析

图 8(a) 为随机分布的无线传感器节点,用数学语言描述为散乱点集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{108}\}$, 图 8(b) 将散乱点集平均分割成 4 部分,每一部分均用 Delaunay 簇连接。为验证 Delaunay 网络拓扑结构的覆盖性,将网络中的每一个节点作为母点,生成其相对应的 Voronoi 图,如图 8(c) 中每一个 Voronoi 区域为当前节点所释放出的能量范围。从图中可以看出, Delaunay 网络所采集的信息覆盖了几乎所有的区域,因此分层分布式 Delaunay 网络拓扑结构具有无线传感器网络的覆盖性的特征,可以用来构建无线传感器网络拓扑结构。

为验证最短距离 Delaunay 网络拓扑结构动态生成算法生成的分层分布式无线传感器 Delaunay 网络拓扑结构的最优性,比较 $180\text{m} \times 230\text{m}$ 的空间内相同节点数目下星型网、网状网、普通的混合网络拓扑结构与本文提出的分层分布式 Delaunay 拓扑结构的网络总开销,如图 9。

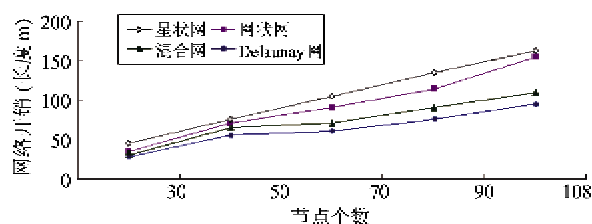


图9 网络总体开销比较

从图 9 中可看出,节点的个数分别为 30, 50,

70, 90, 108 时,比较 4 种网络拓扑结构的连接长度。当节点为 30 时, Delaunay 网与混合网络拓扑长度相差不多,但随着节点数目的增加,当节点数目达到 108 个时, Delaunay 网络因为同时具有混合网络拓扑结构的优点与最近邻点的特性,其拓扑长度比混合网络拓扑结构短很多。因此分层分布式 Delaunay 网络拓扑结构网络总体开销最小、最节能。分层分布式无线传感器 Delaunay 网络拓扑结构与星型网、网状网、普通混合网络拓扑结构的生存周期的比较如图 10 所示。

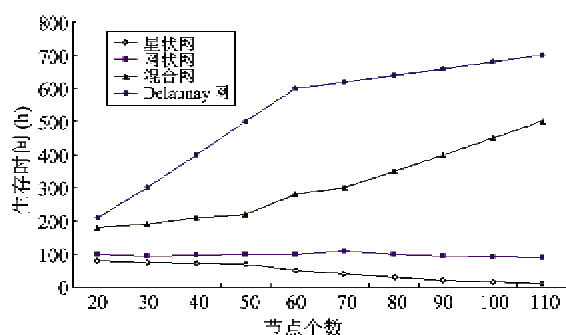


图10 生存周期比较

从图 10 可以看出,本文提出的分层分布式无线传感器 Delaunay 网络拓扑结构的寿命大大优于一一般的网状网与星型网网络结构的性能。比较可以看出, Delaunay 网络拓扑结构对于星型网和网状网的性能改善随着网络节点数目的变化是不断变化的。当节点数量少的时候, Delaunay 网络拓扑结构对于

网络性能的改善并不大,甚至与混合网性能相同;当节点数量多的时候,Delaunay 网络拓扑结构对于网络性能的改善大大增强。同时比较 Delaunay 网络与其他网络的能量消耗如图 11 所示。

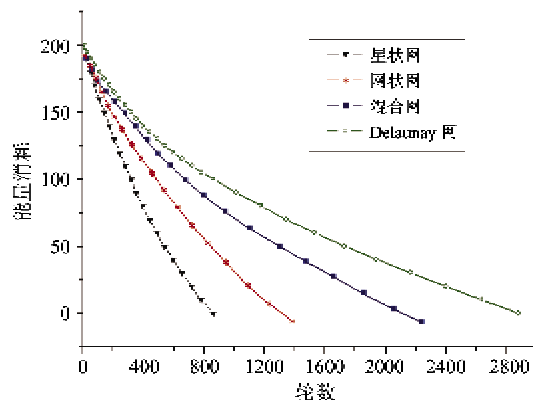


图 11 能量消耗比较

从图 11 中可以看出,因为 Delaunay 网络的所有簇首直接与基站相连,且簇首的选择是在网络运行时根据能量的多少随机变化,相比较其他网络结构,不会出现节点能量迅速消失与网络覆盖率下降问题,其能量消耗较低。

5 结 论

无线传感器网络是目前国内外的研究热点,良好的拓扑结构决定着网络的总体开销和生存时间。本文提出一种具有 Delaunay 三角特性的无线传感器网络拓扑结构,通过实验仿真验证具有覆盖性、稳定性等特性,相比较星型网、网状网与普通混合网络拓扑结构,网络的总体开销最小,同时具有更长的生存周期。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su W, San Y, et al. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102-114
- [2] Deng J, Han Y S, Hei W B, et al. Scheduling sleeping nodes in high density cluster-based sensor networks. *ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications (MONET)*, 2005, 10(6): 825-835
- [3] Khemapech I, Duncan I, Miller A. A survey of wireless sensor networks technology. In: *Proceedings of the 6th Annual Postgraduate Symposium on the Convergence of Telecommunications Networking & Broadcasting*, Liverpool, UK, 2005. 431-435
- [4] Han X F, Cao X, Lloyd E, et al. Fault-tolerant relay node placement in heterogeneous wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM'07)*, Anchorage, AK, 2007. 1667-1675
- [5] 张学, 陆桑璐, 陈贵海等. 无线传感器网络的拓扑控制. *软件学报*, 2007, 18(4): 943-954
- [6] Yu Y, Govindan R, Estrin D. Geographical and energy aware routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom'01)*, Rome, Italy, 2001. 85-96
- [7] 杨宁, 田辉, 张平等. 无线传感器网络拓扑结构研究. *无线电工程*, 2006, 36(2): 11-13
- [8] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: *Proceedings of the 33th International Conference on System Sciences*, Hawaii, USA, 2000. 1-10
- [9] 姜少峰, 王明花. CDCS: 一种基于质心的分布式成簇算法. *计算机应用*, 2007, 27(1): 1-6
- [10] 万琳. 基于三角网格的图像表示方法研究: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2009: 11

An algorithm for generation of wireless sensor networks based on Delaunay

Wu Huarui **, Gao Ronghua **, Yin Changchuan ***

(* National Engineering Research Center for Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097)

(** Key Laboratory for Information Technologies in Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing 100097)

(*** Beijing University of Posts Telecommunications, School of Electronic Engineering, Beijing 100876)

Abstract

To optimize the topology of self-organizing wireless sensor networks and improve the networks' overall performance, an algorithm for generating wireless sensor networks based on Delaunay is proposed according to the node triangulation characteristics of wireless sensor networks. Meanwhile, the working mechanism and the rotation mechanism of information nodes and energy nodes in the network system is given in detail. The simulation results show that the Delaunay topology structure generated in this study using the proposed algorithm is suitable for node communication and data acquisition in a complex environment. And compared with the structures of star network, mesh network and mixed network, the Delaunay network topology structure has the shortest length of the network topology, and the longest lifetime at the same nodes within the fixed region.

Key words: wireless sensor networks, Delaunay, triangulation, topology, routing protocols