

一种无线传感器网络全连通群的休眠调度算法

董蕾 于宏毅 张霞

(解放军信息工程大学通信工程系 郑州 450002)

摘要: 该文针对无线传感器网络的覆盖性和连通性问题, 在假设传感器节点地理位置信息已知的条件下, 设计了一种包含全连通群的建立和维护以及群内节点休眠调度的全新算法。该算法采用保证群内节点彼此一跳可达的全连通群分群方法, 以及分布式节能的休眠调度策略, 最大程度上减少传感器网络的能量消耗, 延长了网络寿命。仿真结果表明: 该算法能较好地保证无线传感器网络的覆盖性和连通性, 且能耗较低。

关键词: 无线传感器网络; 连通性; 覆盖性; 分群; 休眠调度

中图分类号: TP393.07

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)05-1220-04

A Fully Connected Clustering Based Sleeping Algorithm for Sensor Networks

Dong Lei Yu Hong-yi Zhang Xia

(Department of Communication Engineering of PLA Information and Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Aiming at the issue of sensing coverage and connectivity in wireless sensor networks, A complete new algorithm is proposed, on the premise of sensors' position aware. The algorithm adopts a clustering method and a decentralized sleeping method to reduce the energy consumption of wireless sensor networks and to prolong the lifetime of wireless sensor networks. The fully connected clustering method ensures that all sensors in a cluster can communicate with each other within one hop. The result of simulation indicates that the algorithm can maintain sensing coverage and connectivity in wireless sensor networks, while the energy consumption of sensor networks is small.

Key words: Wireless sensor networks; Connectivity; Coverage; Clustering; Sleeping schedule

1 引言

近年来, 随着 MEMS 技术和低功耗数字集成技术的日益成熟和完善, 无线传感器网络技术以其独特的优点和广泛的应用前景, 成为目前研究的热点问题。

传感器网络路由协议的分类方法很多, 可根据网络结构是平面的还是层次的, 将路由协议大致分为两类: 平面式和层次式。层次式路由协议的基本思想是将传感器节点分群, 把通信划分为群内通信和群间通信。由群首节点完成群内通信、数据聚合以及把聚合后的数据传送给节点的任务。

对于无线传感器网络而言, 引入分群的价值在于: (1) 无线传感器网覆盖范围大, 节点数量多, 若采用平面结构, 节点需要存储大量路由信息以供找路时使用。而分群之后, 参与找路过程的节点数量大大减少, 进而需要存储的路由信息也大大减少。(2) 分群之后, 群首节点成为局部控制中心, 便于局部资源的管理和分配。(3) 通常无线传感器网中节点布设十分密集, 位置相近的节点采集到的数据可能存在较大

的相关性和冗余性。而采用分群的方法, 群首能有效地对群内节点采集的数据进行聚合, 去除冗余, 提取有效信息, 提高了网络的传输效率。

由于单个传感器节点的能量资源十分有限且不易替换, 因此如何节约能量资源对无线传感器网络至关重要。在布设了大量的传感器节点的无线传感器网络中, 如果所有节点都工作, 既会带来不必要的能源浪费, 又会在收集数据时存在高度相关和冗余, 还会增加数据传输时发生冲突的可能性, 因此无线传感器网络中存在的一个重要问题是休眠调度。

现有的休眠调度算法大都是针对平面结构的(如PEAS, OGDC^[1]等)。其中OGDC是一种保证网络的覆盖性和连通性的休眠调度算法, 它将网络的工作时间划分成轮, 每轮开始时选举工作节点, 关闭冗余节点, 结束时所有节点恢复初始状态, 等待下一轮开始时重新进行调度。但是该算法是一种平面算法, 没有考虑分群网络情况下如何实现休眠调度, 并且该算法采用固定周期的调度方式, 可能造成网络覆盖性的波动。而现有的分群算法(如LEACH^[2], CEC^[3]等)都未考虑网络的覆盖性问题。因此, 在分群结构下引入休眠调度是十分有意义的。

2005-10-12 收到, 2006-03-24 改回

国家自然科学基金(60472064)和河南省自然科学基金(0511010700)资助课题

基于此，我们提出一种考虑网络可扩展性，同时又保证网络覆盖性和连通性的新的全连通群休眠调度算法(FCCS)。它采用全连通群的分群方法和分布式节能的节点休眠调度策略，尽可能地降低网络能耗，从而延长了网络寿命。

2 全连通群的休眠调度算法

2.1 全连通群

所谓全连通群是指群内任意两节点彼此一跳可达的群。它是一种较为理想的分群方式：首先，全连通群内任意两节点间通信只需要经过一跳，大大简化了群内路由的复杂度；其次，群内的维护较为简单，一旦群首失效，可直接由群内任意能量充足的非群首节点替代，而不需要重新组群。

构造全连通群的难点就在于如何保证群内节点彼此一跳可达，即群内的全连通性。考虑到如果群首已选出，在其邻居节点中任意选择一节点作为群的成员节点，就能保证群首与该节点的连通性。如果以这两个节点邻居节点的交集为基础，从中选出第 3 个节点作为群成员，就能保证这 3 个节点之间的全连通性。依次类推直到群的所有成员邻居节点的交集为空时停止，这样构造出的群就具有了群内的全连通性。下面是全连通群构造的集合表达式：

$$s_1(a_i) = a_i + \sum_{j=1}^{N-1} b_j (b_j \in s_0(a_i); b_j \neq a_i);$$

$$s_0(a_i) \cap s_0(b_1) \cap s_0(b_2) \cdots \cap s_0(b_{j-1}) \cap s_0(b_j) \neq \phi \quad (1)$$

其中 a_i , b_j 为传感器节点； $s_0(a_i)$ 为 a_i 节点的所有邻居节点集合； $s_1(a_i)$ 为以 a_i 为群首构造的全连通群的所有成员节点集合； N 为 $s_1(a_i)$ 中节点的个数。

如何选择群首也是十分重要的问题。群首选择的优劣直接影响到传感器网络的性能：如果选择的好，所构造的群的个数就少，群的成员节点个数就多，所需的激活节点(群首、网关节点)个数就少，从而网络的能耗就小。考虑到如果成员节点相对邻居节点较多的节点先成为群首，这样群的数目就会较少。

2.2 休眠调度

无线传感器网络中节点布设密度较大，存在一定的冗余性，可通过只激活部分节点的方式来延长网络寿命，这一点在大量文献中都有论证^[1, 4]。但是休眠调度需要面临的首要问题是如何保证网络的覆盖性和连通性。下面将在传感器网络中节点地理位置信息已知的假设前提下讨论这个问题。首先介绍几个定义：

- (1) 探测范围(简称圆盘)：以传感器节点为中心，节点探测距离 r_s 为半径的圆形区域。
- (2) 覆盖：若一点被某一传感器节点的探测范围包含，则称该点被覆盖；若区域内的任何一点均被覆盖，则称该区域被覆盖(完全覆盖)。
- (3) 目标区域：传感器网络需要监测的区域，以 R 表示。
- (4) 重叠冗余度：我们把探测范围能包含点 x 的传感器

节点数减去 $I_R(x)$ 后所得到的值为点 x 处的重叠冗余度
 (其中 $I_R(x) = \begin{cases} 1, & x \in R \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$)。区域的重叠冗余度是指区域内

所有点处的重叠冗余度之和。定义重叠冗余度的意义在于：它能表明有多少传感器节点的探测范围对某一点进行了重复覆盖。

2.2.1 覆盖性 文献[1]中提出并证明了，在节点的探测范围面积远远小于目标区域面积，且所有节点的探测范围相同的前提下，对目标区域完全覆盖且网络的能耗较小的情况为：在目标区域内存在相交的圆盘，且所有交点都被第 3 个节点的圆盘包含的条件下(当网络中节点密度较高时可保证)，任意 3 个激活节点构成边长为 $\sqrt{3}r_s$ 的等边三角形(见图 1(a))。文献[1]推导该结论的目的在于：找到用尽量少的传感器节点完全覆盖整个目标区域，从而使网络寿命最大化的方法。

当节点的探测范围相同时，激活节点的数目能表征网络能耗的大小，而最小化区域的重叠冗余度就等价于最小化激活节点的数目，进而等同于最小化网络的能耗。因此只要最小化目标区域的重叠冗余度，就能最小化网络的能耗。下面通过进一步讨论说明文献[1]中的结论确实为对目标区域完全覆盖且目标区域重叠冗余度最小的最优情况。

首先，考虑一种目标区域被完全覆盖时两两相距最近的 3 个圆盘的特殊位置关系(见图 1(b))：两圆盘相切，第 3 个圆盘覆盖该切点。这种情况下 3 个圆盘探测范围被重复覆盖的面积之和为 $(\pi - 2)r_s^2$ ，而图 1(a)情况下为 $(\pi - 3\sqrt{3}/2)r_s^2$ 。这表明与图 1(a)相比，若激活节点的位置关系如图 1(b)所示，则目标区域的重叠冗余度较高。其次，传感器网络中两两相距最近的圆盘的位置还可能出现图 1(c)中的情况，但是这种位置关系下需要增加一个激活节点才能保证对目标区域的完全覆盖。因此在满足完全覆盖且目标区域重叠冗余度最小的前提下，激活节点的理想位置关系如图 1(a)所示。

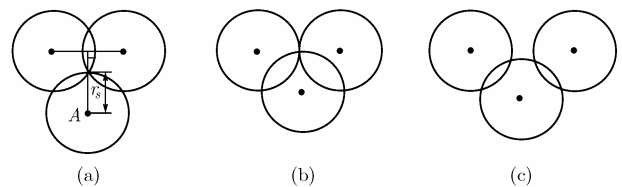


图 1 激活节点位置关系

综上，我们推导出在保证覆盖性前提下确定激活节点的两条准则：

- 准则 1** 若已知一个激活节点位置，则下一个激活节点的理想位置在该激活节点的 $\sqrt{3}r_s$ 距离处；
- 准则 2** 若已知两个激活节点位置，则第 3 个激活节点的理想位置在这两个激活节点连线中垂线延长线上且与这两个节点圆盘的交点距离 r_s 处(如图 1(a) 中 A 点位置)。

2.2.2 连通性 显然，当传感器节点传输距离不小于探测距离的两倍时，只要保证对目标区域的完全覆盖，就能保证工

作节点之间的连通性。本文得到如下结论：假设传感器的传输距离大于探测距离的两倍，对于全连通群，只要在保证网络完全覆盖的最小节点集中调度部分节点充当工作网关就能保证群间的连通性，进而保证全网的连通性。

2.3 算法的实现

2.3.1 全连通群的初始构造及群首的确定

首先，节点间通过交互 hello 消息(其中带有本节点当前的邻居节点列表)，来交互节点的邻居信息。经过几次交互之后，节点可根据邻居列表信息计算出自己为群首构造的全连通群所包含的成员节点。

其次，由群首发起组群邀请消息 invite。群首应当首先由那些“全连通邻居集”较大的节点担任，为了达到这个目的，节点发送 invite 消息前的随机等待时间设为： $\text{delay} = [(1 - n_0/n) + u] \cdot t_0$ (其中 n_0 为以本节点为群首构造的群中成员节点数， n 为本节点的邻居节点数， u 为均匀分布在 $[0,1]$ 之间的随机数， t_0 为消息传播一跳需要的时间)。若等待时间到而节点尚未收到任何节点发来的 invite 消息，则向所有可能的成员节点发送 invite 消息，同时不再接收其他节点发来的 invite 消息。若在等待时间内节点收到其他节点发来的 invite 消息，则立即回复 invite_ack 消息，加入该群，同时取消发送 invite 消息。

第三，节点发送 invite 消息时设置一个计时器以记录有效时间内收到的应答。计时器超时，节点向邻居节点广播成员节点通告消息 men_announce，该消息中带有群首 ID、群成员 ID、群号等信息，这时全连通群的初始构造过程就结束了。

2.3.2 激活/休眠节点集确定

所谓休眠调度就是指激活/休眠节点集的确定。本着以较少数量的激活节点来完成对目标区域完全覆盖的原则，选取激活节点，具体方法与 OGDC 大致相同：

首先，选择激活消息 power_on 的初始发起者。由于在传感器网络的整个工作过程中，群首节点需要始终处于工作状态，因此可使其首先激活成为 power_on 消息的初始发起者。

之后，非群首节点根据自己激活后对网络覆盖性的贡献(网络覆盖性是否提高/不变)来决定是否需要激活/休眠。若节点需要激活，则按照准则 1，准则 2 来确定何时激活。若节点的探测范围被已激活节点完全覆盖(可使用位图(bitmap)来确定节点圆盘被覆盖的情况)，则休眠。希望能量较充足的节点能先醒来工作，因此休眠时间设定为：假设节点 r_s 范围内激活节点工作时间的最小值为 t_{\min} 。如果节点剩余能量小于初始能量的 50%，则将休眠时间设置为 t_{\min} ，否则设置为 $t_{\min}/2$ 。

2.3.3 网关节点的确定

群与群之间的连通有 3 种方式：群首与群首直接连通，群首与群首通过一个网关节点连通，群首与群首通过两个网关节点连通。因此全连通群中一个节点

可能成为本群的网关节点的条件为：节点与其他群的群首或非群首节点一跳可达。

在分群结构的传感器网络中，一个群为一个分布式控制子系统，任意两群相互独立，这就使得如何保证两群之间的网关节点同步工作成为难点。现有的分群算法对这点未进行过深入探讨。本文通过将两群之间的网关节点对的方法解决了该难题。为降低能耗，只在两群之间选取一对工作网关，未被选择的网关节点按照一定原则结成备选网关对后休眠。

选择工作网关的原则是：若两群首直接连通，则不选择工作网关；若两群首不直接连通，则能量大的网关节点先被选择。在群内所有可能的网关节点都确定之后，可通过群首指派本群的工作网关节点，再由其通知相邻群的对应网关节点的方式完成两群之间工作网关的确定(为避免冲突和冗余，规定由群号小的群首发起指派)。若邻居群的对应网关节点不唯一，则首先选择能量大的节点。

未被指派工作的网关节点在收到群首发来的指派消息后：若该节点只能成为本群和一个邻居群之间的网关，则根据指派消息中所带工作网关的工作时间，设置随机关机时间，并将该时间通知邻居群的另一对应网关节点；若该节点可成为本群和多个邻居群之间的网关，则首先随机选择一个邻居群成为本群与该群之间的网关，之后再设置关机时间并通知对应网关节点。若邻居群的对应网关节点为多个，则选择能量大的。这就使得在两群之间的工作网关对失效时，有备选网关对进行替代。

为进一步减少网络的能量消耗，群内暂时不需要工作的普通(非群首，非网关)激活节点在收到指派消息后，需要根据其中所带群首的工作时间进行休眠。

2.3.4 休眠节点的状态转换

探测范围被其他激活节点完全覆盖而休眠的节点醒来后，需要再次根据该节点激活后对网络覆盖性有无贡献来确定是否需要激活。节点可通过向群首查询群内能完全覆盖其探测范围的节点是否仍然有效，来确定其探测范围是否仍然被完全覆盖，如果仍被完全覆盖，就按照第 2.3.2 节中的方法设定休眠时间继续休眠；反之就激活成为普通激活节点。

2.3.5 群首的维护

为使群内节点及时获得群首失效的信息，群首需要周期地向群内节点发送消息以表明其仍然有效，一旦失效，就不再发送该消息。普通激活节点休眠醒来后长时间收不到该消息，即可认为群首已失效，从而成为新的群首并周期发送新的消息。群内节点收到新群首发来的消息后向其注册。

2.3.6 工作网关的维护

工作网关节点可能会由于一些突发原因而失效，这时节点无法通知工作网关对中的另一网关节点，从而破坏了群间的连通性。一对工作网关节点可通过周期交互消息来避免这种情况的出现。一旦工作网关对中的一方长时间收不到另一方发来的消息，即可认为另一方已失效，同样，备选网关节点醒来后长时间收不到这种消息，也

表 1 参数配置

范围	布设节点数量(n)	仿真时间	节点初始能量	节点发送时消耗的能量	节点接收、空闲时消耗的能量	物理信道带宽	OGDC一轮的时间
50m × 50m	50, 75, 100	500s	2000	20	5	2Mb/s	500s

可认为工作网关对失效，从而成为新的工作网关对。

3 仿真性能分析

采用 NS2 网络仿真软件分别对 FCCS 与 OGDC 进行仿真。仿真的网络环境和参数设置如表 1 所示。

从图 2(a)中可以看到 OGDC 40s 后能耗递减的程度与 FCCS 相比较为缓慢，原因是：OGDC 一旦选定激活节点后，就不再交互消息；而 FCCS 各类型节点确定之后，工作节点(群首、工作网关)仍需周期发送消息，休眠节点还需不断醒来检查是否有工作节点失效需替代。

图 2(b)显示出 360s 前 FCCS 与 OGDC 的覆盖率大致相同，并且当 $n=50$ 时 FCCS 的网络覆盖性较好。由于 OGDC 只在新一轮开始时才重新确定激活节点，因此 360s 后 FCCS 的覆盖率明显高于 OGDC。

从激活节点数目曲线(见图 2(c))看出，当 $n=50$ 时 FCCS 的激活节点数与 OGDC 的大致相同。随着节点数量的增加，FCCS 的激活节点数也增加而 OGDC 的基本不变。原因是：随着节点数量的增加，以第 2.3.1 节中的方法得到的群的数量随之增加，因而需要激活的群首和网关节点数量也相应增加。

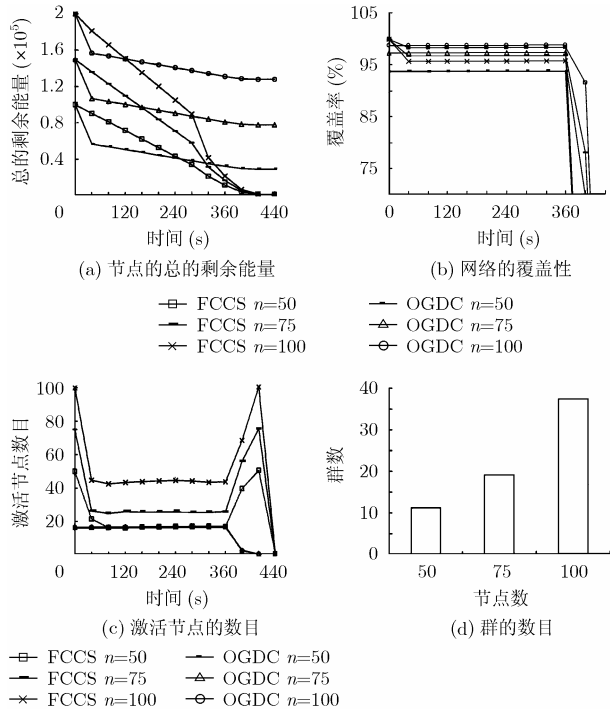


图 2 仿真性能

图 2(d)为节点数量不同时，全连通群的个数。当节点数量为 50 时，群的数量约为节点数量的 22%，而当节点数量增加为 100 时，群的数量则高达节点数量的 37%。

4 结束语

FCCS 采用群内具有全连通性的分群方法，在保证网络的覆盖性的前提下，进行分布式休眠调度，是一次全新的尝试。仿真性能表明它具有较好的网络覆盖性。但是，该算法尚存在不足。当网络节点密度较大时，构造的群还不很理想，存在较多单个节点组成的群。目前算法中对工作网关的调度采用随机组对，由群首指派最初的工作网关对的方式，工作网关对的替代网关对的数量很不确定。在今后的研究中可考虑在群的初步构造结束之后，进行调整，尽量降低单个节点组群的可能和群的数量，对于分群方式下的休眠调度机制仍需继续深入研究。

参考文献

- [1] Zhang Hong-hai and Hou J C. Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. Technical report UIUCDCS-R-2003-2351, June 2003.
- [2] Heinzelman W. Application-specific protocol architectures for wireless networks. [Ph.D. thesis], Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [3] Xu Ya, Bien S, Mori Y, Heidemann J, and Estrin D. Topology control protocols to conserve energy in wireless Ad hoc networks. Submitted for review to IEEE Transactions on Mobile Computing, CENS Technical Report 0006, January 2003.
- [4] Deng J, Han Y S, Heinzelman B, and Varshney P K. Balanced-energy sleep scheduling scheme for high density cluster-based sensor networks. 4th Workshop on Applications and Services in Wireless Networks (ASWN04), Boston, Massachusetts, August, 2004.

董 蕾：女，1981 年生，硕士生，研究方向为无线传感器网路由协议。
 于宏毅：男，1963 年生，教授，博士生导师，主要研究方向为阵列信号处理、第三代移动通信、移动自组网、无线传感器网。
 张 霞：女，1979 年生，博士生，研究方向为移动自组网路由协议、无线传感器网路由协议。