

# 一种面向目标跟踪的无线传感器网络拓扑结构

## Wireless Sensor Network Topology for Mobile Target Tracking

潘旭武 杨东勇 (浙江工业大学屏峰校区软件学院 浙江杭州 310023)

**摘要:** 本文通过优化拓扑结构来延长网络的生存期。首先将节点分成三类,然后将其与基于地理位置的分簇拓扑算法有机结合,形成一种新的面向目标跟踪的无线传感器网络拓扑结构。对该拓扑结构进行实验仿真显示其在目标跟踪领域的应用是有效的。

**关键词:** 无线传感器网络 目标跟踪 拓扑结构 网络生存期

### 1 引言

在无线传感器网络中,由于能量因素是制约网络性能的首要因素,因此,许多人从节约能量消耗的角度上对无线传感器进行了深入的研究。其中,网络拓扑控制对于无线的自组织的传感器网络来说,具有特别重要的意义。通过拓扑控制自动生成的良好的网络拓扑结构,为后续工作奠定基础,有利于节省节点能量来延长网络的生存期。不同应用类型的无线传感器网络,其拓扑结构相差很大,本文针对机动目标跟踪的特点,提出一种新颖的能够有效延长网络生存期的拓扑结构。

### 2 网络拓扑结构

无线传感器网络拓扑控制研究初期,主要把精力集中在了满足网络的覆盖度和连通度,后来慢慢地将能耗因素考虑进去,逐渐形成了以节点功率控制和层次拓扑控制两大阵营。本文提出的面向目标跟踪的拓扑结构,属于后者。层次拓扑控制利用分簇机制,让一些节点形成一个处理并转发数据的骨干网,其它非主干网节点可以暂时关闭通信模块,进入休眠状态以节省能量。比较有代表性的算法是 GAF<sup>[1-2]</sup>、TopDisc<sup>[3]</sup>、LEACH<sup>[4]</sup>和 HEED<sup>[5]</sup>等分簇算法。本文对 GAF 算法进行了一定的选取和优化,再将所有的传感器节点分成簇内节点、簇头节点和边界节点三类角色,最后将改进后的 GAF 算法和三类节点进行有机结合,形成一种新的用于目标跟踪的无线传感器网络拓扑结构,使该拓扑

结构能很好地适应目标跟踪任务,又能延长网络的生存期。

GAF 是以节点地理位置为依据的分簇算法。该算法首先把监测区域分成互不重叠的虚拟单元格,将节点按照位置信息划入相应的单元格;然后在每个单元格中定期地选举一个节点作为簇头节点,只有簇头节点保持活动,其他节点进入休眠状态。GAF 算法是最早采用分簇机制的算法之一,让尽量多的节点处于休眠状态,能够有效的节省能量消耗,但是,该算法在选举簇头节点时,没有考虑节点的剩余能量,随机选择节点作为簇头,不能最有效的使用节点的能量。另外, GAF 算法的虚拟单元格划分方法不能有效保证相邻单元格节点之间进行有效的通信。

#### 2.1 拓扑结构示意图

网络被定义在一个二维平面上来代表现实世界的平原地带,然而现实的空间并非完全水平,需要将传感器节点水平映射到二维水平面上,这样会产生误差,这种误差可以通过算法达到可以接受的程度,如用更精确的节点定位算法,或者在目标跟踪过程中使用较准确的目标预测机制等。

面向目标跟踪的无线传感器网络拓扑结构如图 1 所示,图中的每个圆圈代表一个簇,即由算法分成的互不重叠的虚拟单元形成的节点簇,虚拟单元格虽然互不重叠,但是簇的监测区域是允许重叠的。外围黑色的圆圈代表边界簇,里面空的圆圈代表一般簇。在网络中,所有的节点被分成三类:簇内节点、簇头节点和边界节点,三类节点的功能具体如下。

## 2.2 传感器节点

传感器节点由传感器模块、处理器模块、无线通信模块和能量供应模块组成,本文使用的传感器节点通信模块具有休眠、空闲、接收、发送四种状态,并具有两种传感半径:普通传感半径  $r$  和增强传感半径  $R$ ,在簇

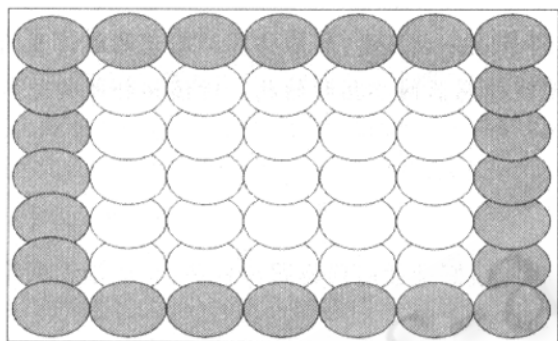


图 1 面向目标跟踪的无线传感器网络拓扑结构示意图

内通信一般使用普通传感半径,簇之间通信使用增强传感半径。根据 Deborah Estrin<sup>[7]</sup>在 Mobicom 2002 会议上的特约报告,四种状态中,使用相同的传感半径的前提下,发送状态的能量消耗最大,在空闲和接收状态能量接近,略少于发送状态的能量消耗,在休眠状态能量消耗最小,而且远远小于发送状态,约为 1/15。

### 2.2.1 簇内节点

簇内节点是拓扑结构中处于最底层的传感器节点,它们的作用是协助簇头节点或者边界节点实现目标定位的功能。这些节点拥有有限的处理能力,受簇头节点或者边界节点的支配。在绝大多数情况下,簇内节点处于耗能相对最少的休眠状态,簇内节点在一个已知半径的区域中能被簇头节点或者边界节点的消息唤醒。只有当目标进入到该成员节点的传感区域并且簇头节点或者边界节点需要该成员节点协助完成目标跟踪任务时,簇头节点或者边界节点会向其发送控制消息,它才从休眠状态切换到活动状态。在这种模式下,该簇内节点的任务是监测目标的当前位置,将监测到目标的位置信息发送给簇头节点或者边界节点,自己不对监测到的位置信息进行任何处理。当目标离开自己的传感区域后,该簇内节点自动从活动状态恢

复到休眠状态。

### 2.2.2 簇头节点

所有的节点都要隶属于一个簇,在每一个簇内,都有一个唯一的管理簇内节点的节点,我们称之为簇头节点。每个簇头节点被假设为拥有比簇内节点更强大的处理能力和通信能力。通常情况下,簇头节点也是被假设为处于休眠状态,只有接收到其他簇头节点或者边界节点的控制信息时,才从休眠状态转换到活动状态。它们通过发送控制消息来协调簇内节点以及与对等的簇头节点之间相互协作完成目标跟踪任务。簇头节点接收到成员节点发送过来的目标位置信息后,完成数据融合功能,并预测目标下一个可能位置,来决定由哪些成员节点协助其完成目标跟踪或者决定是否唤醒另一个簇,由其下游簇来继续跟踪目标。簇头节点还要完成数据路由功能,将有用的数据转发到 LINK 节点,然后通过无线装置转发给用户。

### 2.2.3 边界节点

边界节点是分布在监测区域边缘附近簇的簇头节点。因此它拥有簇头节点的所有功能,另外还要完成以下两个功能:监测是否有目标进入监测区域和确定目标是否已经离开监测区域。为了完成它额外的两个功能,和上述两类节点不同的是,它被假设为永远处于活动状态。

## 2.3 拓扑结构控制算法

算法分为两阶段,第一阶段为虚拟单元格划分,第二阶段为簇头选举阶段

### 2.3.1 虚拟单元格的划分

本阶段的目的是根据节点的位置信息和传感半径,将监测区域划分成若干个互不重叠的正方形虚拟单元格,既要能让簇内节点间能以较少的能量代价相互之间通信,又要使相邻两个单元格中的任意两个节点都能直接通信。在图 2 中,假设监测区域划分为边长为  $d$  的正方形虚拟单元格,为了能保证相邻两个单元格(如 A 能和 B、C、D)中的任意两个节点都能直接通信,需要满足如下公式:

$$(2d)^2 + (2d)^2 \leq R^2 \Rightarrow d \leq \frac{R}{2\sqrt{2}} \quad (1)$$

$$(d)^2 + (d)^2 \leq r^2 \Rightarrow d \leq \frac{r}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

$$\text{由(1)和(2)得到 } d \leq \min\left(\frac{R}{2\sqrt{2}}, \frac{r}{\sqrt{2}}\right) \quad (3)$$

此种划分方法的另一个好处是从分组转发的角度看,属于同一单元格的节点可以认为是等价的,每个单元格选取一个节点作为簇头节点或者边界节点时没有特殊的限制。

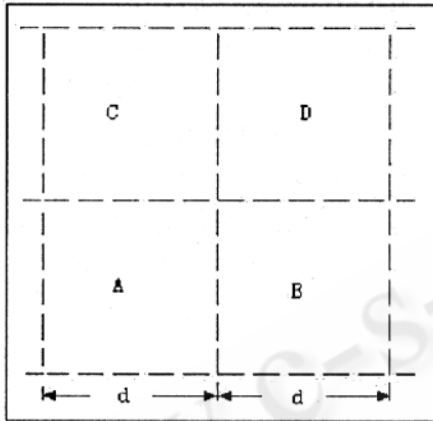


图 2 虚拟单元格划分

### 2.3.2 簇头节点的选举

簇头节点以虚拟单元格为单位进行选举。假设在某个虚拟单元格中有  $n$  个节点,并假设每个节点已经通过某些计算知道自己属于哪个虚拟单元格。选举时间发生在  $T_r$ ,节点用于打开通信模块,发送信息以及相关计算所需的时间为  $T_s$ 。在簇头选举过程中,节点按照编号依次发送和接收通告信息,通告信息  $M$  包含节点已知虚拟单元格中剩余能量最多的节点编号和剩余能量值。

假设其中一个节点  $p(0 < p < n)$ ,具体的簇头节点选举算法为:

(1) 在  $T_r$  时刻:

- 节点 0 和 1 打开通信模块;
- 估算出完成本步骤后剩余能量  $E_0, E_{\max} = E_0, ID_{\max} = 0$ ,生成通告信息  $M = (E_{\max}, ID_{\max})$ ;

- 把公告信息发送给节点 1,并进入休眠状态;

(2) 在  $T_r + (p-1) * T_s$  时刻:

- 第  $p$  节点打开通信模块并接收从第  $p-1$  节点信息  $M = (E_{\max}, ID_{\max})$ ;

- 估算出完成此步后  $p$  节点的剩余能量  $E_p$ ;
- 计算  $E_{\max} = \max(E_{\max}, E_p)$ , 如果  $E_p > E_{\max}$ , 则

$ID_{\max} = p$ ;

- 生成新的  $M = (E_{\max}, ID_{\max})$

(3) 在  $T_r + p * T_s$  时刻:

- 发送信息  $M = (E_{\max}, ID_{\max})$  给的第  $p+1$  节点;
- 第  $p$  节点关闭通信模块;

(4) 在  $T_r + (n-1) * T_s$  时刻:

- 所有的节点打开通信模块,  $n$  节点发送  $M = (E_{\max}, ID_{\max})$ , 其它节点接收此信号, 并比较  $ID_{\max}$  和自己的 ID 号, 如果相同, 则成为簇头节点。如果本节点属于边界簇, 则成为边界节点, 否则关闭通信模块。

当簇头选择算法结束后,除边界节点外,其它节点都处于休眠状态。根据三类节点所扮演的角色不同,边界节点的能耗大于簇头节点的能耗,簇头节点又大于簇内节点的能耗,当运行一段时间后,簇头节点的能量到达一个阈值时,则再次以虚拟单元格为单位重新进行簇头节点的选举。

由算法可以推知,除了第一个节点和最后一个节点外,其它节点需要打开通信模块的时间为  $3T_s$ , 第一个节点与最后一个节点只需要  $2T_s$ , 而能量耗费与通信模块打开的时间通常成正比, 由此可知, 该算法的空间复杂度为  $O(3(n-2) + 4) \in O(n)$ 。

## 3 仿真实验

本节通过仿真实验对算法进行验证和分析。实验假设在  $600\text{m} \times 600\text{m}$  的监测区域上分布密度为  $2.5 \times 10^{-3}$  个/ $\text{m}^2$  的节点。假设节点的普通通信半径  $r = 70\text{m}$ , 增强通信半径  $R = 120\text{m}$ 。则由公式(3)计算得到  $d \leq \min(42.5, 49.5)$ , 取  $d = 40\text{m}$ , 因此监测区域就被分成  $40\text{m} \times 40\text{m}$  的 225 个单元小区域。

实验一: 如图所示, 某机动目标的运动轨迹为图中的实线部分, 小圆点为传感器监测到的目标实际位置。节点选择坚持的一个原则是: 上次跟踪目标采样时所使用的三个节点如果对本次传感采样能用, 即预测位置点与所选的三个节点之间的距离最大值不超过  $70\text{m}$ , 则不再选择新的三个节点。如果不行, 则在目标预测位置所在虚拟单元中激活三个节点。在本文提出的面向机动目标跟踪的无线传感器网络拓扑结构的基础上, 采用 H. Yang 和 B. Sikdar<sup>[6]</sup> 的跟踪方法进行机动

目标跟踪仿真,虚线为预测目标移动轨迹,星号为网络每次传感采样计算后得到的预测目标位置。本实验中,机动目标传感采样次数为 153 次,预测位置与目标实际位置的平均距离为 25.1m,预测与目标实际位置的最大距离为 58.9m,标准差为 14.0m,目标实际位置与被选择的三个节点的平均距离为 35.7m,最大距离为 91.3m,方差为 36.8m,超过 70m 的次数占全部预测次数的 5.8%,机动目标经过虚拟单元格的个数为

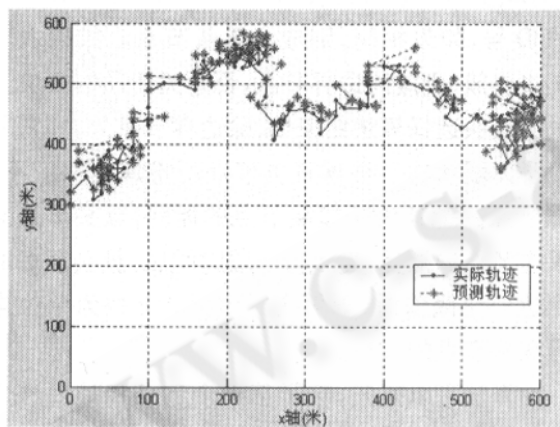


图 3 机动目标运动实际位置与预测位置比较

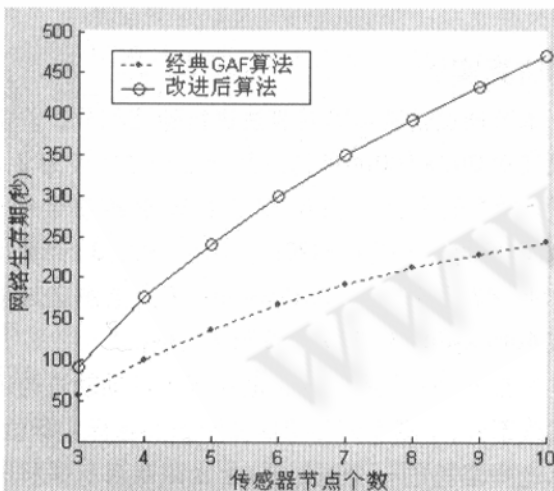


图 4 经典 GAF 算法和改进后算法网络生存期比较

45 个,但参与跟踪的簇个数为 12 个。由以上实验数字可以看出,网络根据预测位置所启动的三个节点绝大多数能用普通传感半径监测到机动目标当前位置,仅少部分位置点需要使用增强传感半径。该实验证明:

该拓扑控制算法,对机动目标跟踪是适用的。

实验二:假设传感器节点的初始能量均为 100 单位,根据 Deborah Estrin<sup>[7]</sup>的能量消耗模型,节点在发送、接收、和空闲状态下能量消耗基本相同,设每秒消耗量为 1.5 单位,在休眠状态下的能量消耗为 0.1 个单位。假设重新进行簇头选举的阈值为 50 和 30 单位。根据上述的三类节点功能叙述,边界簇上的头节点即边界节点是从整个网络开始工作就要一直处于活动状态的,因此其耗能是最大的。本文对边界簇进行仿真,测试边界簇的生存期。假设边界簇的节点从三个到十个,分别测试网络生存期的时间长度,并与经典 GAF 算法的网络生存期进行比较。实验结果如图 4。由图 4 可知,本文拓扑控制算法比经典 GAF 算法的生存期要长,使用本文的拓扑结构控制方法比用经典的 GAF 更有效。

#### 4 结论

本文将传感器节点分成三类,每类节点完成不同的任务,将暂时不用的节点处于休眠状态,很好地节省了能量的消耗。然后将三类节点与基于节点地理位置信息的拓扑控制算法结合,对其中的虚拟单元划分和簇头选择算法做了改进,使之能更有效地使用能量。仿真实验证明,本文提出的拓扑控制算法在能满足目标跟踪基本前提下,有效地使用节点能量,延长网络的生存期。

#### 参考文献

- 1 Xu Y, Heidemann J, Estrin D. Geography - informed energy conservation for ad hoc routing , In: Proc 7th Annual Int'l Conf on Mobile Computing and Networking (MobiCom), Rome, Italy. July 2001. 70 ~ 84.
- 2 Santi P. Silence is golden with high probability: Maintaining a connected backbone in wireless sensor networks. In: 1st European Workshop on Wireless Sensor Networks, Berlin, Jan 2004.
- 3 Deb B, Bhatnagar S, Nath B. A topology discovery algorithm for sensor networks with applications to network management. DCS technical Report DCS - TR - 441, Rutgers University. May 2001.

(下转第 44 页)

- 4 Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. An application - specific protocol architecture for wireless microsensor networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660 ~ 670.
- 5 Younis O, Fahmy S. Distributed clustering in ad-hoc sensor networks: A Hybrid, energy - efficient approach. In: proc 13th Joint Conf on IEEE Computer and Communications Societies ( INFOCOM ), March 2004.
- 6 H. Yang and B. Sikdar, "A protocol for tracking mobile targets using sensor networks", IEEE, Sensor Network Protocols and Applications, Proceedings of the First IEEE, International Workshop, pp. 71 - 81, May 11, 2003.
- 7 Deborah Estrin. Tutorial "wireless sensor networks" Part IV: Sensor Network Protocols. MobiCom 2002. <http://nest1.ee.ucla.edu/tutorials/mobicom02/>.