

无线传感器网络的分簇拓扑控制算法研究

刘华军¹

LIU Huajun

摘要

在层次型分簇拓扑控制算法的基础上,提出非均匀分簇 EBUC 的拓扑控制算法,建立无线传感网络内的多个非均匀节点簇,设置靠近基站的簇规模更小、远离基站的簇规模更大,同时合理选择簇首节点、设置节点非均匀竞争半径,采取簇间多跳路由机制,使能量水平较高的节点选择基站附近能量高的节点进行数据转发,以最大程度节省网络能量、延长网络生命期。仿真实验表明,相比于其他算法而言,分簇拓扑控制算法的节点簇拓扑稳定性、能耗均衡性更加优秀。

关键词

无线传感器网络;分簇拓扑控制算法;多跳路由;能量均衡控制

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.04.034

0 引言

在远基站节点簇的通信过程中,存在着簇间或簇内节点能耗不均、发射功率控制不当、覆盖区通信干扰等问题,使得网络通信能耗不均匀。基于 EBUC (energy-balanced unequal clustering algorithm) 非均匀分簇的拓扑控制算法,是在无线传感器网络中,搭建起非均匀分簇拓扑结构、多跳路由的传输选择机制,根据簇节点自身能量、节点到基站间的距离,动态设置不同簇半径、簇规模的大小,调节簇节点的簇首、信息发射功率,保证各簇覆盖区域内的网络拓扑结构合理性、簇间多跳路由通信能耗的均匀性。

1 无线传感器网络的关键技术及系统组成结构

1.1 无线传感器网络的核心支撑技术

无线传感器网络作为自组织、分布式的多跳性网络,通常依托于数据链路层协议,以及定位技术、拓扑控制技术等的核心技术,建立起包含多个网络节点簇的数据传输拓扑结构。^[1]

(1) 网络通信协议。针对无线传感器网络提出的数据链路层协议,包括 CSMA 多路访问机制、基于竞争/预约的 MAC 控制协议。其中 CSMA 多路访问协议的基本原理是,网络节点对通信信道进行监听、监听时间间隔为 IFS,若 IFS 时间内网络信道空闲,则可展开数据传输;若网络信道被占用,则推迟并等待空闲时的数据传输。

MAC 介质访问控制协议是网络分层路由协议,采取周期性侦听与睡眠、多跳感知的数据传输方式,网络节点在一定时间监听无线信道、其他时间进入睡眠,周期性的调度自

身时间表、决定是否发送数据;在网络节点发送数据分组时,会先进行信道载波侦听,选择未进入睡眠状态的节点构成多跳通信路径,保证多跳网络分组传输的时延。

(2) 定位技术。无线传感器节点位置的定位技术包括测距 (range-based) 定位算法、分布式无测距 (range-free) 定位算法,通过网络通信节点间距离、角度信息的测量,最大精度估计被测节点的所处位置。通过利用以上节点定位算法多次测量,可获取无线传感器网络中,被测节点的绝对或相对位置。

(3) 拓扑控制技术。拓扑控制为无线传感器网络的关键技术,根据网络节点是否可移动,分为动态、静态传感器节点控制。在保障网络连通、节点覆盖质量的前提下,利用 COMPOW、DLMST、LEACH 等拓扑控制算法,建立起传感器网络拓扑结构的发射功率控制、MAC 层级控制方案,完成不同网络节点发射功率、睡眠调度、能量消耗的部署与控制。

1.2 无线传感器网络系统组成结构

无线传感器网络由多组传感器节点 (sensor node)、汇聚节点 (sink)、基站网络、远程监控中心等结构组成,具体系统架构如图 1 所示。其中无线传感器节点为嵌入式结构,属于网络系统的数据采集与通信模块,包含环境感知、通信协议控制、数据处理控制、电源供给等组成构件,通常采取人工布置、飞机布设方式,进行监测区域内的无线传感器节点布设。^[2]而汇聚节点、网络基站等装置,主要负责采集监测区域环境内的节点数据传送,将有效信息通过多个设备传送到远程管理中心。与此同时,远程管理中心也可将网络配置数据发送至基站,由基站进行传感器节点的配置与管理。

1. 91550 部队 辽宁大连 116023

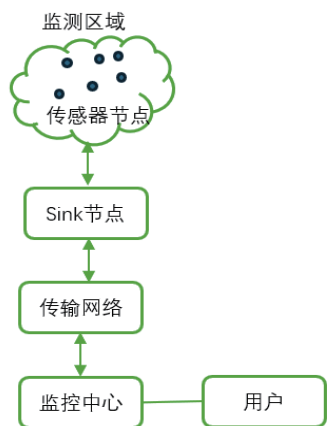


图1 无线传感器网络系统组成结构

sink 节点为无线传感器网络的汇聚节点，相较于其他传感器节点而言，有着更高的数据处理、传输能力，且能够缓存部分的节点数据信息。远程监控中心则为 sink 节点数据的处理分析中心，负责网络拓扑控制、数据链路质量管理，利用非均匀分簇 EBUC 算法、多跳路由通信机制，设置 QoS 链路队列、网络数据传送带宽，控制网络节点的启动/休眠状态、信道通信传输时间，以便于降低网络节点能耗、延长数据传输的生命周期，实现无线传感器信道的数据安全稳定传输。

2 无线传感器网络传统的拓扑控制算法

2.1 无线传感网络的功率控制算法

无线传感器网络中存在多个节点、节点簇，单一节点若拥有足够大的发射功率，就可与其他任意的邻节点进行通信，但若某一节点的发射功率过大，则其本身的数据传输能量消耗将越快、节点间相互干扰越强，也会造成传感器网络信道通信的拥堵问题^[3]。为解决以上问题，传统的无线传感器网络数据传送控制方案是采用 LMA 算法、LMN 算法等拓扑控制方案，对节点的数据发射功率进行调节控制。

无线传感网络的功率控制算法包括 LMA、LMN 的拓扑控制算法，是基于节点度（一跳节点子树数目）的发射功率控制算法。如 LMA（local mean algorithm）本地平均算法，属于基于节点度的功率控制算法，首先预设节点度的上下限值分别为 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ ，当网络节点的节点度小于 $T_{\min}$ 时，增大其发射功率；当网络节点的节点度大于 $T_{\max}$ 时，减小其发射功率，计算公式为：

$$\begin{aligned} P_{\max} &= \{A_{\text{dec}} \cdot (1 - (N - T_{\min})) \cdot P_{r_0}\} \\ P_{\min} &= \{A_{\text{dec}} \cdot (T_{\min} - N) \cdot P_{r_0}\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中： $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$ 分别表示增大、减小的节点发射功率； A_{dec} 表示能量消耗率； P_{r_0} 表示原始节点发射功率； N 表示原始节点度数。该算法在信道数据通信中，无需严格的传感器网络时间同步，对网络节点多条路由转发的要求也不高，但仍旧存在着节点数据资源传送、能量消耗的缺陷问题。

2.2 传统传感器网络发射功率控制算法存在的问题

基于节点度子树的发射功率控制算法是节点分簇拓扑控制方案，在网络数据传送中，通常面临着簇节点通信干扰、能耗不均等问题^[4]。假设节点 u 向距离自身 d 处的节点 v 发送数据包，且节点 v 处于节点 u 最大发射半径的范围内，那么节点 u 的数据传送包括两种方式：一是节点 u 、节点 v 直接进行数据传输；二是节点 u 经节点 w 等其他节点转发后，传送至节点 v 。

由于无线传感器网络是随机的自组织模型，则根据以上节点 u 直接发射功率为 p_d 、经过中继节点 w 的间接发射功率为 p_{d1} 、 p_{d2} ，则根据 $\triangle uwv$ 、 $\gamma = \angle uwv$ 的已知条件，可计算得出的发射功率关系^[5]为：

$$p_d^2 = p_{d1}^2 + p_{d2}^2 - 2p_{d1}p_{d2}\cos\gamma \quad (2)$$

由于 w 处于节点 u 的覆盖区域 C 内、 $\cos\gamma \leq 0$ ，则根据式 (2) 可得 $p_d^2 \geq p_{d1}^2 + p_{d2}^2$ 。因而节点 u 、节点 v 间的直接数据传送，节点 u 消耗的能量较大，整个无线传感器网络的能耗不均匀。其中簇首节点的能量消耗包括节点传送数据采集、数据融合、基站通信能耗，远高于其他普通节点的能耗，且靠近基站周围节点的数据流量大，簇首节点的数据信息处理、传输任务重，可能在网络拥塞情况下造成数据消息碰撞、数据包丢失等问题。从节约能耗的角度来看，尽可能采用多跳、短边的簇节点通信传输方式，选择合适的网络节点发射功率，来降低无线传感器网络数据传送的能量消耗。

3 非均匀分簇 EBUC 拓扑控制算法模型

无线传感器网络的通信数据传送，不仅要考虑簇内节点间能量的均衡性，还需考虑全局网络的簇间能量均衡性。为此，基于 EBUC 拓扑控制算法，根据节点自身能量大小、节点与基站间的距离，将节点的簇设置为不同规模大小，靠近基站节点的成簇半径小、远离基站节点的成簇半径大，且近基站的簇首节点，承担着其他节点的通信数据转发任务^[6]。

根据节点剩余能量的大小，引入候选簇首机制，让剩余能量更大、靠近基站的节点成为候选簇首，针对节点到基站的距离、节点能量参数，计算出候选簇首的非均匀竞争半径。其中传感器网络节点处于数据发送状态时能量消耗最高，空闲、接收状态时能量消耗次之，休眠状态时能量消耗最低，各状态时的能耗比约为 2000:400:400:1。

假设 $M \times M$ 的监测区域内，部署着 N 个传感器节点，节点集合表示为 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$ ，节点间通信距离表示为 d ，通信距离阈值设置为 d_0 。节点单跳传送 1 数量级 (bit) 的消息至目标节点时，其能量消耗用公式表示为：

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} lE_{\text{elec}} + l\epsilon_f d^2 & d < d_0 \\ E_{\text{elec}} + l\epsilon_{mp} d^4 & d \geq d_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: E_{elec} 表示节点发送、接收数据的电路能量消耗; ε_{fs} 、 ε_{mp} 分别表示无线传感器网络的信道信号放大参数、衰落信道参数。由于无线传感器网络中包含簇首、候选簇首、簇成员、普通节点等的节点, 候选簇首的产生采取竞选机制, 在全局范围内设置随机数 $T \in (0,1)$, 控制参选候选簇首的节点比例, μ_0 为 $(0,1)$ 之间的常量参数, μ 为参与竞选候选簇首的节点数量, 则候选簇首的竞选机制公式为:

$$\mu = \mu_0 e^{\frac{E_{resi}}{E_{init}}} \quad (4)$$

式中: E_{init} 、 E_{resi} 分别表示节点 S_i 的初始能量、剩余能量。由式 (4) 可得, μ_0 值越小、 μ 值越小, 则参与竞选的节点剩余能量越大, 剩余能量最大的节点更容易当选为候选簇首节点, 非候选簇首进入睡眠状态^[7]。

同时, 考虑分簇节点拓扑结构的竞争半径, 假设每个节点存在竞争半径 R_c , R_c 大小与节点到基站距离相关, 距离基站越近的节点其竞争半径越小, 反之其竞争半径越大。依据网络节点的剩余能量水平、节点与基站间的距离等参量, 计算候选簇首节点的竞争半径公式为:

$$R_c = \left[1 - c \frac{d_{\max} - d_{\text{toBS}}}{d_{\max} - d_{\min}} - (1-c) \left(1 - \frac{E_{resi}}{E_{init}} \right) \right] R_{\max} \quad (5)$$

式中: $d_{\max}$ 、 $d_{\min}$ 分别表示节点到基站的距离; d_{toBS} 表示候选簇首节点到基站的距离; $R_{\max}$ 表示网络节点最大的竞争半径; c 为 $0 \sim 1$ 之间的实数, 用于控制能量、距离等参量对节点竞争半径的影响程度。若两个节点的剩余能量近乎相等, 则比较节点到基站的成簇半径, 反之则比较节点剩余能量; 若 $d_{\text{toBS}} \approx d_{\max}$ 且 $E_{resi} \approx E_{init}$ 时, 则候选簇首节点的竞争半径 R_c 接近于 $R_{\max}$ 。

在网络节点 $R_{\max}$ 的竞争半径范围内, 所有候选簇首采取相同的发射功率, 对 `finde_neigCH_msg` 的通信消息进行广播, 同时每个候选簇首接收其他候选簇首的发射消息。候选簇首 S_i 的邻居候选簇首集合可设置为 $S_i.\text{CH_neig}$, $S_i.\text{CH_neig} = \{S_j | S_j = \text{candihead and } d(S_i, S_j) < \max(R_c, S_i, S_j, R_c)\}$ 。由此计算出候选簇首的能量之比 F_e , 相对于邻居候选簇首的平均能量势 E_{aver} 如下式 (6) 所示:

$$F_e = \frac{E_{resi}}{E_{\text{aver}}} \quad E_{\text{aver}} = \frac{\sum_{j=0}^m S_j \cdot E_{resi}}{m} \quad (6)$$

式中: $m = |S_i.\text{CH_neig}|$ 。由式 (6) 可得出, E_{resi} 值越大, 候选簇首的能量比值 F_e 越大, 节点剩余能量越高; E_{resi} 值越小, 候选簇首相对于邻居候选簇首的平均能量势 E_{aver} 越高。若候选簇首 S_i 大于其邻居候选节点的能量比值 F_e , 则表明 S_i 节点竞选成为正式簇首, 待正式簇首 S_i 广播 `formal_head_msg` 消息后, 其他候选簇首节点退出竞选。具体 EBUC 算法的执行模型如图 3 所示^[8]。

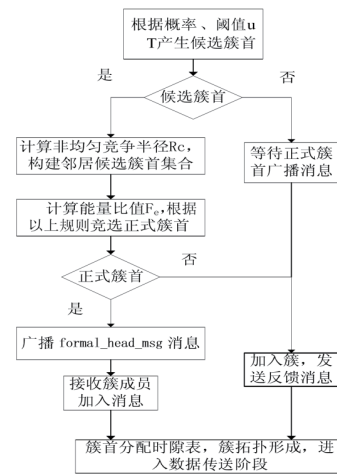


图 3 EBUC 算法的执行模型

4 EBUC 拓扑控制算法的仿真实验与分析

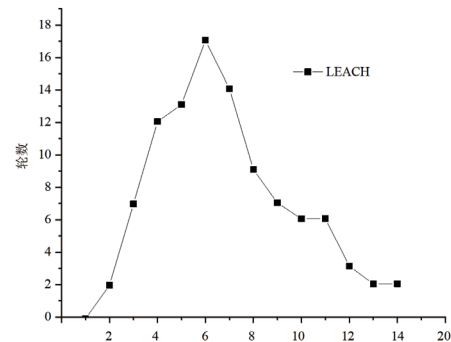
4.1 仿真实验

在无线传感器网络 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 的监测区域, 随机布撒 $N=200$ 个的传感器节点, 节点初始能量设为 0.5 J , 设置通信距离阈值 $d_0=87 \text{ m}$, 电路损耗 $E_{\text{elec}}=50 \text{ bit}$, $c=0.5$, $T=0.1$, $R_{\max}=75$, 以及 $\varepsilon_{fs}=10 \text{ nJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^2)$, $\varepsilon_{mp}=1.3 \times 10^{-3} \text{ pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^4)$ 和 $E_{DF}=5$, 发送的数据包大小为 4000 bit 。其中 c 、 T 、 $R_{\max}$ 等参量的取值会影响候选簇首数目的多少、竞争半径的大小。

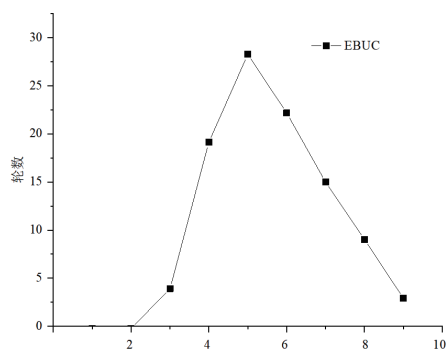
利用 TOSSIM 软件搭建 WSN 节点仿真环境, 将 EBUC 拓扑控制算法、与 LEACH 经典分簇算法进行对比实验。其中 LEACH 算法采取单跳的簇间通信模式, 根据节点剩余能量进行通信; EBUC 算法采取多跳路由的簇间通信模式, 在非均匀竞争半径内, 依据节点剩余能量、节点与基站距离, 竞争并选出正式簇首完成通信。对图 3 的 EBUC 算法执行模型进行仿真, 得到簇首节点数目分布、能量消耗、生命周期的仿真结果^[9-11]。

4.2 实验结果分析

利用 EBUC、LEACH 分簇算法进行随机 50 轮仿真实验, 统计生成的簇首节点个数及其分布情况、簇首网络能量消耗的均衡性、网络节点生命周期等结果, 得到图 4、图 5 的网络拓扑算法可靠性的实验结果。



(a) LEACH 算法的簇首节点数目及分布



(b) EBUC 算法的簇首节点数目及分布

图 4 EBUC、LEACH 算法统计生成的簇首节点个数及其分布情况

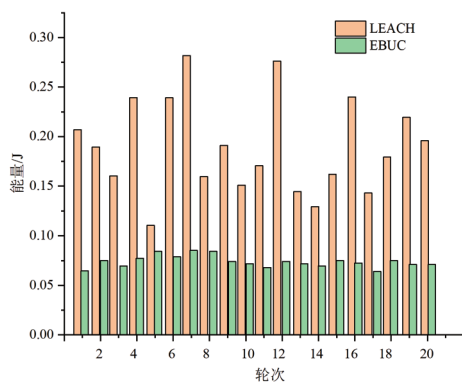


图 5 簇首网络能量消耗均衡性的算法仿真结果

从图 4 的簇首节点个数及其分布情况来看, LEACH 算法簇首数目的波动范围大、集中程度不高,表明其对簇首节点的选择具有随机性。相比而言, EBUC 算法的簇首数目集中程度更高,这是由于该算法全局考虑节点剩余能量、节点到基站的距离,基本实现了算法生成的簇首数目、簇首集中程度的有效控制。

有关簇首网络能量消耗的均衡性、节点网络生命周期的仿真结果显示, LEACH 算法的簇首能量消耗之和明显高于 EBUC 算法的簇首能耗之和,且 LEACH 算法的簇首能量消耗波动也明显高于 EBUC 算法。这一现象产生的主要原因在于 EBUC 算法采用非均匀分簇拓扑、簇间多跳路由方式,进行监测范围内的节点数据通信传输,降低了低能量节点当选簇头的概率。另外,在经过 200 ~ 800 的轮次后, EBUC 算法的网络节点生命周期优于 LEACH 算法,最后一个网络节点死亡时经历了约 900 轮次,且第一至最后一个节点死亡轮次的时间更短,表明 EBUC 算法能够保证簇间能耗的均衡稳定性、延长网络生命期。

5 结语

无线传感器网络作为以数据为中心的自组织、分布式网络,近年来被广泛用于商业医疗、环境监测、建筑节能等领域。而无线传感器网络搭建、数据通信传输中的拓扑控制是降低

网络能量消耗、节点通信干扰、延长网络生命周期的关键。相比传统的 Internet 网络而言,无线传感器网络具有自组织、分布式、动态变化的拓扑结构,且网络簇节点的传输能力有限、发射能量不均匀。为解决无线传感器网络节点能量、通信能力受限,以及节点发射功率对周围节点干扰的问题,引入 EBUC 拓扑控制算法,设置无线传感器网络的拓扑结构、控制方案,根据非均匀分簇机制,选择骨干的簇首节点、调整节点发射功率,进行簇内、簇间网络数据的处理和转发,并在此过程中合理调度冗余节点、动态控制簇节点的睡眠与运行,来减少簇节点的能量消耗之和,延长网络数据传输的生命周期。

参考文献:

- [1] 朱瑞金, 龚雪娇, 唐波. 分布式混合压缩感知无线传感器网络数据收集 [J]. 计算机工程与应用, 2019(6):73-80+112.
- [2] 高翔霄, 俞达, 任月慧, 等. 无线传感器网络数据传输延时分配算法 [J]. 计算机测量与控制, 2020(5):258-262.
- [3] 王伯槐, 李芸芸. 基于无线传感器网络的数据采集系统研究 [J]. 榆林学院学报, 2020(2):80-82.
- [4] 侯明星, 元慧, 黄斌科. 基于分布式压缩感知的无线传感器网络异常数据处理 [J]. 计算机科学, 2020(1):276-280.
- [5] 张屹, 陈立军, 蒋慧勇. 基于大数据的无线传感网络数据采集的研究 [J]. 信息技术与网络安全, 2019(9):39-43.
- [6] 王波. 基于物联网的无线传感网络数据采集方法 [J]. 内蒙古民族大学学报 (自然科学版), 2019(1):9-14.
- [7] 包正睿, 窦琛琛. 面向可充电无线传感器网络的分布式多跳数据采集算法 [J]. 电力信息与通信技术, 2020(7):8-13.
- [8] 田洪舟, 陈思溢, 黄辉先. 基于改进海鞘群算法的无线传感器网络节点定位 [J]. 传感器与微系统, 2021(9):139-141.
- [9] 赵雅坤, 徐娟, 蒋娇龙. 基于 RSSI 与移动锚节点运动轨迹的定位算法 [J]. 计算机工程, 2019(1):35-39.
- [10] 王慧娇, 吕奎霖, 蒋华. 基于多功率移动锚节点的 WSN 定位算法 [J]. 计算机工程与设计, 2019(8):2117-2122+2189.
- [11] 段亚青, 王华倩, 乔学工. 基于测距和灰狼优化的无线传感器网络定位算法 [J]. 传感技术学报, 2018(12):1894-1899.

【作者简介】

刘华军 (1976—), 男, 湖北仙桃人, 高级工程师, 研究方向: 目标特性与环境构建技术。

(收稿日期: 2024-01-22)