

基于非均匀成簇的无线传感器网络多跳路由算法

吴标 崔琛 余剑 易仁杰
(电子工程学院 401 室 合肥 230037)

摘要 针对复杂、不规则场景下无线传感网络的高效能组网问题,提出了一种基于非均匀成簇的无线传感器网络多跳路由算法 MRAUC。根据应用场景形状不规则、汇聚节点远离检测区域等特点,首先将检测区域近似成汇聚节点位于扇心的扇环,建立了扇型场景下无线传感器网络的非均匀成簇模型;通过等间隔划分扇环,以第一扇环能耗最小为原则确定各扇环的簇首数目,进一步推导出各扇环内的最佳簇首比例;通过簇首发射功率的自适应调整实现非均匀分簇;同时,以 MTE 原则竞选出最佳中继簇首,有效解决了簇首间的路由中继问题。仿真结果表明,与传统算法相比,在不同应用场景下所提 MRAUC 算法在均衡网络节点能耗、延长网络生命周期方面具有显著优势,更适用于工程实际。

关键词 无线传感器网络,非均匀成簇,扇环,多跳路由

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.02.024

Multi-hop Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks Based on Uneven Clustering

WU Biao CUI Chen YU Jian YI Ren-jie
(401 Laboratory, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract Aiming to solve the highly efficient networking problem of wireless sensor networks(WSN) under a complex and irregular scenario, a multi-hop routing algorithm based on uneven clustering(MRAUC) was proposed for wireless sensor networks. Firstly, according to the characteristics that irregular shape of the scenario and the sink node are far away from the detection area, the algorithm approximates the detection area into an annular sector of which the sink node is located in the heart. Based on the annular sector scenario, the uneven clustering is established for wireless sensor networks. The detection area is divided into annular sectors with equal segmentation, then the cluster head number and the best proportion of each annular sensor are determined by the minimum energy consumption of the first annular sensor. Through adaptively transmitting power of cluster head, the uneven clustering is realized. At the same time, the best relaying cluster head is determined by the MTE principle, which effectively overcome the routing relaying problem between cluster heads. The simulation results show that compared with the traditional algorithm, the new algorithm has significant advantages in balancing energy consumption between nodes and prolonging the network life cycle. As a result, it is more suitable for engineering practice.

Keywords Wireless sensor networks, Uneven clustering, Annular sector, Multi-hop routing

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)是由成千上万个传感器节点组成且以自组织的形式完成组网的无基础设施的大规模无线感知网络。近年来,随着微电子技术、无线通信技术和传感器技术的迅速发展,一种具有环境感知、数据处理和传输的嵌入式系统的技术变得更加成熟,从而降低了每个无线传感器节点的成本。传感节点通过相互协作的方式实现数据的收集、处理和信息的交互,完成对指定区域

的实时监控,主要应用于军事、森林防火、海洋监控、医疗护理等方面,具有广泛的应用前景^[1-3]。传感网络节点通常由电池供电且受体积、成本、功耗等因素的影响,其计算、存储和通信能力均受到限制。因此,如何对网络中有限的资源进行充分利用及有效平衡网络的负载是延长网络工作寿命、均衡网络能量消耗的关键,其已日渐成为传感器网络研究的重点。

LEACH(Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)^[4]是一种最具代表性的层次性分簇路由算法,其核心思想是通过节点轮流担当簇首,使得网络中能耗尽量均衡,能够有效减

到稿日期:2016-01-13 返修日期:2016-04-30 本文受电子工程学院院控基金(KY13A206)资助。

吴标(1991-),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络节能路由协议, E-mail: wubiao@163.com; 崔琛(1962-),男,硕士,教授,博士生导师, CCF 会员,主要研究方向为信号与信息处理、无线传感器网络路由协议, E-mail: kycuichen@163.com; 余剑(1980-),男,硕士,讲师,主要研究方向为无线传感网络安全, E-mail: jimmyyul112@hotmail.com; 易仁杰(1990-),男,博士生,主要研究方向为无线传感网络定位, E-mail: 18226656895@163.com。

少网络失效时的能量浪费,延长网络的整体寿命,从而广泛应用于无线传感器网络中。文献[5]结合剩余能量和距离因素修正了阈值公式,但选举出的簇首数目仍会出现过多或过少的现象;LEACH-C^[6]集中控制簇头的选举,使簇头分布更加合理,集中控制的代价是汇聚节点需频繁地与所有节点进行信息交互,造成能量的浪费,只有接收到汇聚节点的全局消息以后才能确定簇首,普通节点确定要加入的簇,降低了算法的时效性;文献[7]采用自适应调节机制控制簇头广播消息的广播半径,均衡节点分布与能量消耗,在簇内通信中采用“四向覆盖”算法,仅少数节点处于工作状态,该算法是以丢失网络大量信息为代价来提高网络的生命周期;蒋畅江等人^[8]通过减小距离基站节点的成簇半径实现了非均匀分簇,进而实现了能量在整个网络中均衡。

文献[4-8]中算法均以方形网络环境为模型,同时节点间的信息和数据交互都是以单跳完成的,因此存在以下问题:1)实际环境中面临的组网区域复杂、不规则,因此算法的应用范围受到限制;2)与单跳方式相比,簇首与汇聚节点间采用“多跳”的通信方式更能节省能量,延长网络的生命周期^[9]。在“多跳”方面以多跳 LEACH(Multi-hop variant of LEACH, M-LEACH)^[10]算法为代表,该算法通过簇内节点转发的方式,完成节点间的信息传输和数据交互,但仅减少了簇内的能耗,簇首与汇聚节点仍以单跳方式传输信息;文献[11]提出了多跳簇首模型,该模型采用从下到上的策略,逐层生成簇首,最后得到一个多层结构的 WSN 网络;文献[12-13]的核心思想是非均匀成簇,临时簇首根据自身距离汇聚节点距离的不同形成不同的竞争半径,通过竞争半径的不同形成大小不一的簇,使靠近汇聚节点的簇的规模小于远离汇聚节点簇的规模,以节省用于中继其他簇首的数据时的能量,均匀簇间的消耗,但网络环境仍以正方形为模型,参数较多,设置比较困难;文献[14-15]将圆形区域划分成环,汇聚节点位于圆心,根据节点的位置确定每个环内的簇首比例,分别在各环内分别选举出临时簇首,在整个区域内由临时簇首竞争产生最终簇首,环间簇首以多跳方式将收集的数据传递给汇聚节点,环间多跳通信很好地完成网络的多跳组网,简化了路由,但仅适用于汇聚节点在圆心的圆形场景,选取中继簇首时以距离最短为原则。

针对以上问题,本文考虑场景复杂、不规则情况下无线传感器网络的高效能组网问题,提出了一种基于非均匀成簇的网络传感器网络多跳路由算法 MRAUC。首先根据应用场景形状不规则、汇聚节点远离检测区域等特点,将检测区域近似划分成同扇心的不同扇环,建立扇型场景下无线传感器网络非均匀成簇模型;通过等间隔划分扇环,以第一扇环能耗最小为原则确定各扇环的簇首数目,进一步推导出各扇环内的最佳簇首比例;通过簇首发射功率的自适应调整实现非均匀分簇;同时,以 MTE 原则竞选出最佳中继簇首,有效克服了簇首间的路由中继问题。理论分析与实验仿真表明:与传统算法相比,在不同应用场景下,所提的 MRAUC 算法在均衡网络节点能耗、延长网络生命周期方面具有显著优势,更适用于工程实际。最后,仿真结果验证了算法的有效性。

2 基础模型

2.1 网络模型

网络模型设定在半径为 $R_1 \sim R_2$ 的扇形区域之间(深色区域)的 S 内,如图 1 所示。 N 个节点随机均匀分布在该区域,汇聚节点位于扇心上,坐标为 $(Sink_x, Sink_y)$ 。网络还具备以下特点:1)每个节点均具有唯一的 ID;2)网络布置完成后节点的位置不再移动且节点的位置信息已知,汇聚节点的位置固定;3)节点能量均是有限的,汇聚节点的能量不受限制;4)节点的发射功率根据传输的需要自动可调;5)通信是对称的,节点根据收到的其他节点的信号强度得到与其他节点的距离。

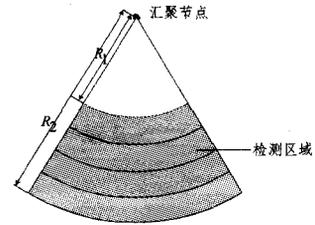


图1 网络模型

注:将汇聚节点布置到检测区域外的一定距离后,可将任何不规则场景等效为扇环。该模型适用范围更广,在小扇角下直到圆环下均可达到很好效果。

2.2 能耗模型

该算法采用文献[4]中的能耗模型,网络的能耗主要集中在传感节点发射数据、接收数据和数据融合上。无线传感器节点的耗能主要由无线发射部分和功率放大组成,而功率放大模块与传输距离有关。当传输距离小于 d_0 时采用自由空间传输模式;当传输距离大于 d_0 时采用多径衰减模式。节点向 d 距离之外的节点发送 k bit 消息的能耗为:

$$E_{Tx}(k, d) = kE_{dec} + k\epsilon_{amp}d^\beta = \begin{cases} kE_{dec} + k\epsilon_{fs}d^2, & d \leq d_0 \\ kE_{dec} + k\epsilon_{mp}d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, E_{dec} 为节点电路能量消耗系数, ϵ_{fs} 为自由空间传输损耗, ϵ_{mp} 为多径衰减传输损耗, d_0 为自由空间传输模式与多径衰减模式的切换阈值,可通过式(2)得到:

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (2)$$

接收能耗可通过式(3)计算:

$$E_{Rx} = kE_{dec} \quad (3)$$

用 E_{DA} 表示融合单位长度数据的能耗,那么簇首融合长度为 l 的数据的能耗可表示为:

$$E_A = E_{DA} \cdot l \quad (4)$$

3 MRAUC 算法介绍

进行网络初始化,由汇聚节点(Sink节点)配置本网络的全局初始化消息,该消息主要包括汇聚节点的位置信息 $(Sink_x, Sink_y)$ 、网络的区域范围 R_1 和 R_2 、节点总数 N 、划分的环数 T 、每个环内的簇首比例 $P = \{P(i) | i=1, 2, \dots, T\}$ 、各扇环成簇的平均半径 $r = \{r(i) | i=1, 2, \dots, T\}$, θ 为扇环扇心

的角度。汇聚节点以广播的形式向检测区域发送Sink_ADV_MSG((Sink_x, Sink_y), R₁, R₂, δ, N, T, P, r, θ)消息,告知距汇聚节点较近的节点,节点接收到该消息后以泛洪方式广播此消息。这样,区域内所有节点均获悉网络的全局初始化消息。对于网络初始化信息中 P 的确定,需获悉各环的最佳簇首数目,其由 3.1 节可得,完成网络初始化之后进入网络运行阶段。网络的运行流程图如图 2 所示,分为临时簇首选举阶段、网络成簇阶段、数据传输阶段,详细过程见 3.2 节。

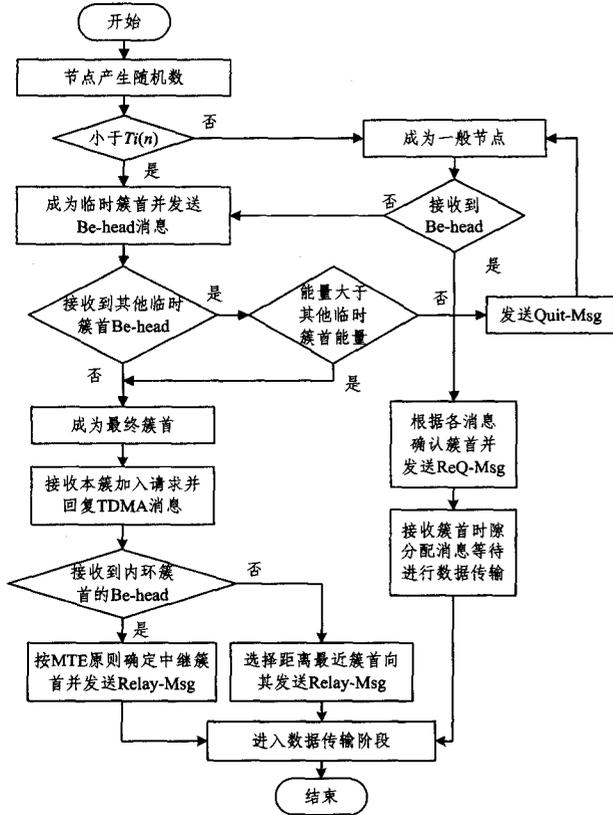


图 2 算法的流程图

3.1 最佳簇首数目

将检测区域 S 均等地分成 T 个扇环,从内向外分别记为第 1 扇环,第 2 扇环,⋯,第 T 扇环。扇环间距为 δ,中心角为 θ,节点在该区域内服从随机均匀分布。

$$\delta \cdot T = R_2 - R_1 \Rightarrow \delta = \frac{R_2 - R_1}{T} \quad (5)$$

第 k 环内的节点数目为:

$$N_i = \frac{[(2i-1)\delta + 2R_1]}{(R_1 + R_2)T} N, i=1, 2, \dots, T \quad (6)$$

在每个环内各簇以相同半径的圆覆盖,簇首位于每个簇的圆心上。那么第 i 环的簇首距离 Sink 节点距离平方的均值为:

$$E[d_{chi}^2] = \int_0^\theta \int_{(i-1)\delta+R_1}^{\delta+R_1} \frac{r^2}{\frac{\theta}{2} [(i\delta)^2 - ((i-1)\delta)^2]} dr d\theta = \frac{(i\delta+R_1)^2 + ((i-1)\delta+R_1)^2}{2} \quad (7)$$

同理,第 i 环的簇首距离 Sink 节点的距离均值为:

$$E[d_{chi}] = \int_0^\theta \int_{(i-1)\delta+R_1}^{\delta+R_1} \frac{r}{\frac{\theta}{2} [(i\delta)^2 - ((i-1)\delta)^2]} dr d\theta$$

$$= \frac{(i\delta+R_1)^3 - ((i-1)\delta+R_1)^3}{\frac{3\delta}{2} [(2i-1)\delta+2R_1]} \quad (8)$$

根据式(9)可求出各环间的簇首距离平方的均值:

$$E[d_{chi,i-1}^2] = E[(d_{chi} - d_{ch(i-1)})^2] = E[d_{chi}^2] + E[d_{ch(i-1)}^2] + 2E[d_{chi}]E[d_{ch(i-1)}] \quad (9)$$

第 i 环内存在 m_i 个簇首,其中 i=1, 2, ⋯, T, 则第 i 环内簇首耗能、簇首和成员节点能耗分别如式(10)和式(11)所示:

$$E_{chi} = lE_{rx} \left(\frac{N_i}{m_i} - 1 \right) + lE_{DA} \frac{N_i}{m_i} + l \frac{\sum_{j=i+1}^T m_j}{m_i} (E_{rx} + E_{tx} + E_{fs} E[d_{chi,i-1}^2]) + l(E_{tx} + E_{fs} E[d_{chi,i-1}^2]) \quad (10)$$

$$E_{non_chi} = l(E_{tx} + E_{fs} E[d_{tochi}^2]) \quad (11)$$

其中, $E[d_{tochi}^2] = \frac{\theta}{\pi} \cdot \frac{1}{8m_i} [(R_1 + i\delta)^2 - (R_1 + (i-1)\delta)^2]$ 。

那么一个簇的能耗为:

$$E_{Clusteri} = E_{chi} + \left(\frac{N_i}{m_i} - 1 \right) E_{non_chi} \approx E_{chi} + \frac{N_i}{m_i} E_{non_chi} \quad (12)$$

每个环所有节点耗能的总和为:

$$E_{total} = m_i \cdot E_{Clusteri} = m_i E_{chi} + N_i E_{non_chi} \quad (13)$$

$$\frac{\partial E_{total}}{\partial m_i} = lE_{fs} E[d_{chi,i-1}^2] - lN_i E_{fs} \frac{\theta}{2\pi m_i^2} (R_1 + i\delta)^2 - lN_i E_{fs} \frac{\theta}{2\pi m_i^2} (R_1 + (i-1)\delta)^2 = 0 \quad (14)$$

$$所以, m_i = \sqrt{\frac{N_i \theta}{8\pi} \sqrt{\frac{\delta [2R_1 + (2i-1)\delta]}{E[d_{chi,i-1}^2]}}}$$

3.2 MRAUC 算法

由 3.1 节可知每个扇环的最佳簇首数目和节点数目,进而可求得 $P = \{P(i) = \frac{m_i}{N_i} | i=1, 2, \dots, T\}$ 各环簇首的比例。

MRAUC 算法的运行仍按“轮”^[4]进行,工作过程分成 3 个阶段:临时簇首选举阶段、网络成簇阶段、数据传输阶段。临时簇首选出以后采用簇首半径自适应的方式调整临时簇首的角色,均衡簇首在网络中的分布。

距汇聚节点一定距离的非规则区域可被等效为扇环的模型,根据非规则区域的不同特点可将非规则区域等效为扇环角不同的扇环模型;即使在传统正方形或圆形的模型下,汇聚节点布置到检测区域以外的一定距离后也可将正方形或圆形等效为扇环模型,因此,本文所提网络模型较已有模型适用性更广。算法首先将非规则区域等效为扇环,根据最内扇环能耗最小的原则确定各扇环的最优簇首数目,各扇环各自进行簇首选择,实现网络簇的非均匀构建。在网络簇的构建中,充分利用节点间的组网信息以确保簇首在簇内能量较高且不会过密或过疏分布;簇与簇的中继选择采用了 MTE 原则。因此, MRAUC 算法很好地控制了每轮选出簇首的数目和簇首在网络内的分布,并且被选出的簇首是能量较高的节点,通过自适应成簇半径控制实现簇规模的非均匀构建,距离汇聚节点越远,簇规模越小,簇内成员越少,节省了簇首在处理簇内数据时用以中继距汇聚节点较远簇首的数据的能耗;另一方面,以 MTE 为原则选取簇首的中继簇首对象是最小传输能耗的方式。综上所述, MRAUC 算法在均衡网络的能耗、延长

网络的生命周期方面有显著优势。本节以下内容是对MRAUC算法过程的详细描述。

3.2.1 临时簇首选举阶段

汇聚节点将网络的全局消息布置下去以后,网络内所有节点获取网络的全局消息,包括汇聚节点位置和每个扇环簇首的比例及成簇半径等。各节点获取全局信息后由式(15)获取节点所处的扇环位置,并根据所处位置确定所处环的簇首比例,其中 $\lfloor x \rfloor$ 表示取不小于 x 的最小整数。

$$k = \left\lfloor \frac{d((i_x, i_y), (Sink_x, Sink_y)) - R_1}{\delta} \right\rfloor \quad (15)$$

MRAUC算法在每个扇环内分别独立采用簇首轮转机制选择临时簇首,并将节点的剩余能量考虑进去,采用式(16)确定每轮不同环内节点成为簇首的概率,使各扇环选出的簇首尽可能为剩余能量最大的。每个扇环内的节点自主地产生一个在 $[0, 1]$ 之间的随机数,若该数小于本扇环的成簇概率 $T_i(n)$,则成为临时簇首。

$$T_i(n) = \begin{cases} \frac{P(i)}{1 - P(i) \times [r \bmod (1/P(i))]} \cdot \frac{EnRe_n}{EnIni_n}, & n \in G_i \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

其中, r 表示当前的轮数; G_i 表示第 i 扇环内在当前的一个簇首轮转周期内尚未担当簇首的节点集合; n 表示第 i 扇环内 G_i 的某个节点; $EnRe_n$ 表示节点 n 当前剩余能量; $EnIni_n$ 表示节点 n 初始化能量。

3.2.2 网络成簇阶段

传统的分簇路由算法^[3,4,15]簇首的选举采用严格随机轮转的方式,在很大程度上会使得簇首在某一区域分布得过于密集或者稀疏,从而造成覆盖区域的重叠和“空洞现象”,MRAUC算法采用自适应成簇方式可很好地解决此问题。假定在最理想的情况下,传感节点均随机均匀分布在整个检测区域内,成簇也是均匀的,从而各扇环内成簇半径公式为:

$$\begin{aligned} \pi r^2(i) \times \lceil N_i \times P(i) \rceil \\ = \pi(R_1 + i\delta)^2 - \pi(R_1 + (i-1)\delta)^2 \\ \Rightarrow r(i) = \sqrt{\frac{[(R_1 + i\delta)^2 - (R_1 + (i-1)\delta)^2]}{\lceil N_i \times P(i) \rceil}} \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $\lceil x \rceil$ 表示取不大于 x 的最小整数。

网络中确定为临时簇首的节点在其 $2r(i)$ 内广播Be-head消息,该消息中主要包括临时簇首的位置、ID、节点剩余能量等,这样杜绝了两个簇首间距离小于 $2r(i)$ 的情况出现,在其范围内的临时簇首和普通节点均接受该消息。临时簇首接收到其他临时簇首的消息以后,比较其能量的高低,若该节点能量较低,则直接放弃簇首竞争并发送Quit-Msg消息,否则当选为最终簇首;若临时簇首未接收到其他临时簇首的Be-head消息,则直接成为最终簇首。普通节点根据接收到的临时簇首的Be-head和Quit-Msg消息,选出距离本身最近的最终簇首作为其簇首,并向其发送ReQ-Msg消息,该消息主要包含节点ID和簇首ID;普通节点若未收到任何Be-head消息,则为最终簇首并向外广播Be-head消息。

簇首接收到本簇成员所有的ReQ-Msg消息以后,根据本

簇成员的数目建立TDMA时隙表,并为每个成员分配时隙,然后将该消息告知其簇成员,表示该簇首已同意加入请求。非第1扇环最终簇首根据接收到内一扇环簇首的Be-head消息,按最小能量消耗(Minimum Transmission Energy, MTE)^[4]为原则决定中继簇首并向其发送Relay-Msg消息;若未收到任何内一扇环簇首消息,则直接选择距自身最近的簇首作为中继对象。第1扇环内的最终簇首与汇聚节点直接进行通信。

3.2.3 数据传输阶段

网络各节点明确自身担任的角色以后,普通节点根据簇首的TDMA消息获悉传输数据的时隙,普通成员节点收集其感知范围内的信息以后,仅在分配的时隙内将感知数据传递给簇首。在其他节点的时隙内节点处于睡眠状态以节省能量。簇首收集完本簇成员的数据以后,将数据融合后发送给内一扇环事先选定的中继簇首或者汇聚节点。若接收到外一扇环簇首的数据,则直接与本簇融合后的数据一起发送出去。网络所有数据均传送到汇聚节点后,数据传输阶段结束即本轮结束。然后下一轮开始,网络进入临时簇首选举阶段,如此循环反复。

4 仿真实验

为了验证所提MRAUC算法在均衡网络能耗和最大化网络生命周期上的有效性,以MATLAB R2013b作为实验仿真平台搭建起仿真实验环境,按照表1中的参数设置进行实验。MRAUC算法主要与LEACH算法、EEUC算法以及RBMC算法进行比较,主要在网络能耗情况、网络生存时间两方面进行对比验证MRAUC算法的有效性。扇心角 θ 取 $\pi/3, \pi/2, \pi$ 和 2π ,在不同应用场景中验证MRAUC算法的优越性。

表1 仿真参数设置

参数	值
内径 R_1/m	60
外径 R_2/m	300
汇聚点位置	(0,0)
节点数目 $N/\text{个}$	1000
环数 T	3
节点初始化能量/J	0.5
$E_{dec}/\text{nJ/bit}$	50
$E_{DA}/\text{nJ/bit}$	5
$\epsilon_{fs}/\text{pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^2)$	10
$\epsilon_{mp}/\text{pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^4)$	0.0013
d_0/m	88
数据包大小/bit	2000
控制包大小/bit	100

4.1 网络能耗情况

网络的能耗情况主要考量网络节点耗能的均值和网络节点耗能的方差,每轮中节点能耗均值越少、方差越小,网络中节点间的能耗越均衡,更利于延长网络的生命周期。图3(a)~图3(d)是扇心角 θ 分别取 $\pi/3, \pi/2, \pi$ 和 2π 时对应节点平均耗能的变化情况,从图中可知MRAUC算法每轮节点的平均能耗明显低于LEACH算法和EEUC算法的能耗,且随着场景的改变,MRAUC算法始终保持在较低水准,表现得较为稳健。当扇心角取 60° 时,LEACH算法每轮节点的能耗在

7.0×10^{-4} 左右波动,EEUC算法每轮节点的能耗在 5.7×10^{-4} 且比 LEACH 波动幅度小,但 MRAUC 算法却在 2.7×10^{-4} 左右的更大幅度波动。图 4(a)~图 4(d)分别是扇心角 θ 取 $\pi/3, \pi/2, \pi$ 和 2π 时网络每轮节点能耗方差的变化情况。网络所有节点能耗的方差和 LEACH 在 $4.5 \times 10^{-6} \sim 8.5 \times 10^{-6}$ 范围内波动, MRAUC 算法始终保持在 1.0×10^{-6} 以下的小幅度波动, EEUC 算法随着扇心角的增大,其所有节点能耗方差从 2.0×10^{-6} 减少至 0.8×10^{-6} 左右波动,但其方差始终大于 MRAUC 算法所有节点的能耗方差。在 θ 取 2π 时, RBMC 算法所有节点能耗的方差和与 MRAUC 算法很接近,但 RBMC 算法每轮节点的平均能耗均大于 MRAUC 算法。可见, MRAUC 算法在网络中使每轮能耗更为均衡,明显优于 LEACH 算法、EEUC 算法和 RBMC 算法,且适应范围更广。

网络中存活节点的数目。 θ 取 $\pi/3, \pi/2, \pi$ 和 2π 时对应 LEACH 算法第一个节点死亡轮数分别为 365, 380, 382, 378, 对应 EEUC 算法第一个节点死亡轮数分别为 669, 848, 1145, 1214, 对应 MRAUC 算法第一个节点死亡轮数分别为 1162, 1298, 1355, 1498。 θ 取 $\pi/3$ 时, MRAUC 算法较 LEACH 算法和 EEUC 算法在网络生命周期上分别提高了 218.4% 和 73.7%; θ 取 $\pi/2$ 时, MRAUC 算法较 LEACH 算法和 EEUC 算法在网络生命周期上分别提高了 241.5% 和 53.1%; θ 取 π 时, MRAUC 算法较 LEACH 算法和 EEUC 算法在网络生命周期上分别提高了 254.7% 和 18.3%; θ 取 2π 时, MRAUC 算法较 LEACH 算法、EEUC 算法和 RBMC 算法在网络生命周期上分别提高了 296.2%, 23.4% 和 22.3%。综上可知, MRAUC 算法较 LEACH 算法在不同应用场景中均一定程度地延长了网络的第一个节点的死亡时间;在不同的应用场景中较 EEUC 算法也有不同程度的提高,且在扇心角度较小时, MRAUC 算法的优势更为明显。

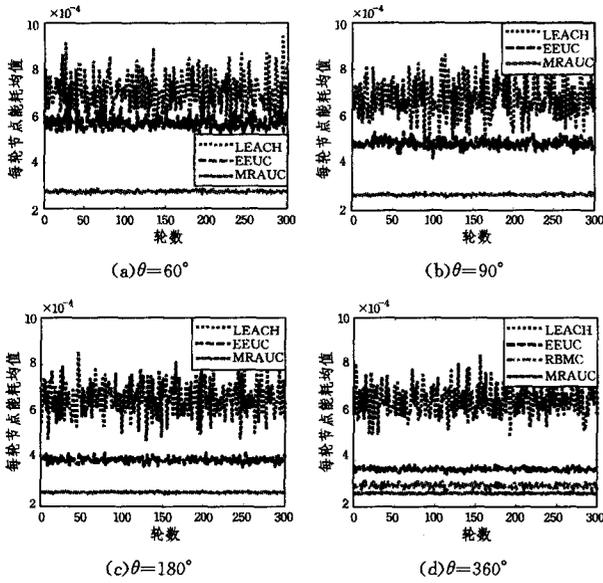


图 3 每轮节点能耗均值

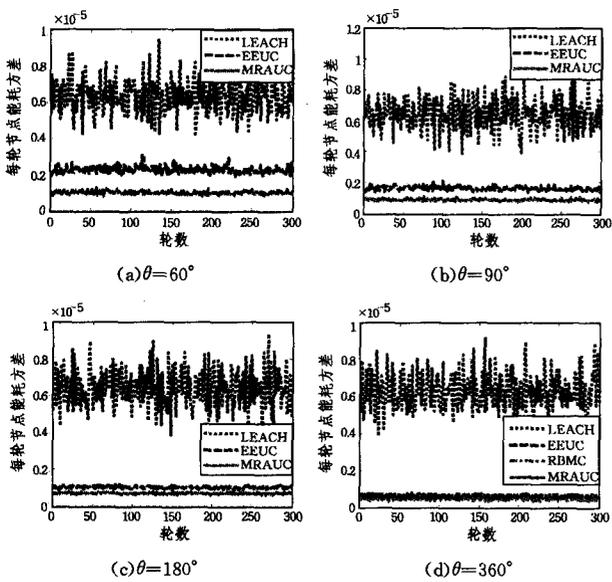


图 4 每轮节点能耗方差

4.2 网络生存情况

图 5(a)~图 5(d)分别是扇心角 θ 取 $\pi/3, \pi/2, \pi$ 和 2π 时对应的网络生命周期的情况,横坐标为仿真的轮数,纵坐标为

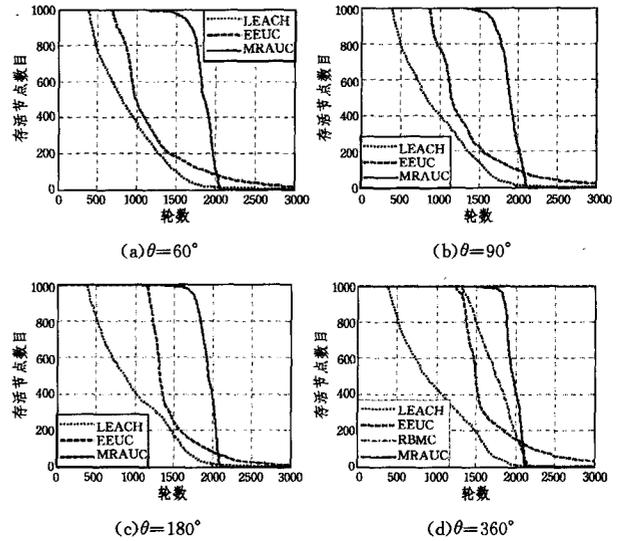


图 5 不同场景下网络节点的生存情况

结束语 针对复杂、不规则场景下无线传感网络的高效能组网问题,提出了一种基于非均匀成簇的无线传感器网络多跳路由算法 MRAUC。首先根据复杂、非规则化的场景特点,将检测区域近似为汇聚节点于扇心的扇环区域,建立了扇环情形下的无线传感网络非均匀成簇模型;通过将检测区域划分成等距离的同扇心的扇环,以最内扇环能耗最小为原则推导出每个扇环最佳的簇首数目,并且得到各扇环的最佳簇首比例;通过自适应控制各扇环簇首的发射功率,实现网络非均匀成簇;在中继簇首选取上以 MTE 为原则,保证选取最利于网络节能的簇首作为中继簇首。最后将 MRAUC 算法与 LEACH 算法、EEUC 算法以及 RBMC 算法进行了性能对比,仿真结果表明,在不同应用场景下,本文的 MRAUC 算法在均衡网络各节点的能量消耗、延长网络生命周期方面具有显著优势,更适用于工程实际。

参 考 文 献

[1] LIU W, CHEN H, CHEN M. A survey of wireless sensor networks[C]// Proceedings of the World Automation Congress,

- Puerto Vallarta, Mexico, 2012; 305-307.
- [2] MA Z C, SUN Y N, MEI T. Survey on wireless sensors network[J]. Journal of China Institute of Communications, 2004, 25(4): 114-124. (in Chinese)
马祖长, 孙怡宁, 梅涛. 无线传感器网络综述[J]. 通信学报, 2004, 25(4): 114-124.
- [3] SAKTHIDHARAN G R, CHITRA S. A survey on wireless sensor network; an application perspective[C]//Proceedings of the International Conference on Computer Communication and Informatics. Coimbatore, India, 2012; 1-5.
- [4] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//Proceedings of the International Conference on System Sciences. Hawaii, USA, 2000; 3005-3014.
- [5] LIU Y H, ZHAO Y F, XU K H, et al. Improvement of LEACH in wireless sensor networks[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(17): 117-120. (in Chinese)
刘玉华, 赵永峰, 许凯华, 等. 无线传感器网络 LEACH 协议的改进[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(17): 117-120.
- [6] HEINZELMANWR, ANANTHAP, CHANDRAKASANHB. An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2002, 1(4): 660-670.
- [7] SHI W R, BAI D, GAO P, et al. Cluster-head range adaptive adjustment clustering routing protocol for wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(8): 1779-1785. (in Chinese)
石为人, 柏荡, 高鹏, 等. 无线传感器网络簇头半径自适应调节路由算法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1779-1785.
- [8] JIANG C J, SHI W R, TANG X L, et al. Energy-Balanced unequal clustering routing protocol for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2012, 23(5): 1222-1232. (in Chinese)
蒋畅江, 石为人, 唐贤伦, 等. 能量均衡的无线传感器网络非均匀分簇路由协议[J]. 软件学报, 2012, 23(5): 1222-1232.
- [9] MHATRE V, ROSENBERG C. Design guidelines for wireless sensor networks; Communication, clustering and aggregation [J]. Ad Hoc Networks, 2004, 2(1): 45-63.
- [10] BANDYOPADHYAY S, COYLE E J. An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks[C]//IEEE Societies INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE, 2003, 3: 1713-1723.
- [11] MHATRE V, ROSENBERG C. Homogeneous vs heterogeneous clustered sensor networks; a comparative study[C]//2004 IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2004, 6: 3646-3651.
- [12] LEE S, CHOE H, PAR B, et al. An energy-efficient unequal clustering algorithm using location information for wireless sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2011, 56(4): 715-731.
- [13] LI C F, CHEN G H, YE M, et al. An Uneven Cluster-Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks [J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(1): 27-36. (in Chinese)
李成法, 陈贵海, 叶懋, 等. 一种基于非均匀分簇的无线传感器网络路由协议[J]. 计算机学报, 2007, 30(1): 27-36.
- [14] LIU Z, QIU Z D. Ring based multi-hop clustering routing on algorithm for wireless sensor networks[J]. Journal of China Institute of Communications, 2008, 29(3): 104-113. (in Chinese)
刘志, 裘正定. 基于分环多跳的无线传感器网络分簇路由算法[J]. 通信学报, 2008, 29(3): 104-113.
- [15] LU S, XU W C, YANG Y. A ring based multi-hop clustering routing weighting algorithm in wireless sensor networks [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2012, 42(4): 24-28. (in Chinese)
鲁松, 徐文春, 杨云. 一种分环多跳的无线传感器网络分簇路由加权算法[J]. 山东大学学报(工学版), 2012, 42(4): 24-28.
- (上接第 134 页)
- [15] Adobe. HTTP Dynamic Streaming on the Adobe Flash Platform [EB/OL]. https://bugbase.adobe.com/index.cfm?event=file.view&id=2943064&seqNum=6&name=httpdynamicstreaming_wp_uc.pdf.
- [16] Dynamic Adaptive Streaming over HTTP [EB/OL]. https://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic_Adaptive_Streaming_over_HTTP.
- [17] STOCKHAMMER T. Dynamic adaptive streaming over HTTP: standards and design principles[C]//Proceedings of the Second Annual ACM Conference on Multimedia Systems. New York: ACM, 2011; 133-144.
- [18] THANG T C, LE H T, PHAM A T, et al. An evaluation of bitrate adaptation methods for HTTP live streaming[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(32): 693-705.
- [19] LIU C, BOUAZIZI I, HANNUKSELA M M, et al. Rate adaptation for dynamic adaptive streaming over HTTP in content distribution network[J]. Signal Processing; Image Communication, 2012, 27(4): 288-311.
- [20] ROMERO L R. A dynamic adaptive HTTP streaming video service for Google Android[C]//Communication Systems Cos. 2011; 33-51.
- [21] LIN Rui. The design and implementation of multi-rate adaptive streaming transmission system based on server-driven[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013. (in Chinese)
林锐. 基于服务器驱动的多码率自适应流媒体传输系统的设计与实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.
- [22] LI Z, ZHU X, GAHM J, et al. Probe and adapt: Rate adaptation for http video streaming at scale[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(4): 719-733.
- [23] JIANG J, SEKAR V, ZHANG H. Improving fairness, efficiency, and stability in http-based adaptive video streaming with festive[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. New York: ACM, 2012; 97-108.
- [24] MUELLER C, LEDERER S, POECHER J, et al. Demo paper: Libdash-an open source software library for the mpeg-dash standard[C]//2013 IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops. Washington: IEEE, 2013; 1-2.