

基于蝙蝠优化算法的多基站分区路由协议

李双双^a, 杨文忠^a, 吴向前^a, 石 研^b, 高秋田^b

(新疆大学 a. 信息科学与工程学院; b. 软件学院, 乌鲁木齐 830046)

摘 要: 为解决无线传感器网络中因簇头能量消耗不均所产生的热区问题, 提出一种多基站分区路由协议。在监测区域中部署多个基站并进行合理的分区, 采用引入变尺度混沌策略的蝙蝠优化算法选择簇头节点, 以避免蝙蝠算法陷入局部最优。在数据传输阶段, 簇头节点选择剩余能量大于平均能量且离基站最近的节点作为下一跳。仿真结果表明, 相比 LEACH 协议和 DEBUC 协议, 该协议能够有效减少并均衡能量消耗, 提高数据包接收量, 延长网络的生存周期。

关键词: 无线传感器网络; 路由协议; 蝙蝠优化算法; 分簇; 能效

中文引用格式: 李双双, 杨文忠, 吴向前, 等. 基于蝙蝠优化算法的多基站分区路由协议[J]. 计算机工程, 2018, 44(6): 80-85, 92.

英文引用格式: LI Shuangshuang, YANG Wenzhong, WU Xiangqian, et al. Partition routing protocol with multiple sinks based on bat optimization algorithm[J]. Computer Engineering, 2018, 44(6): 80-85, 92.

Partition Routing Protocol with Multiple Sinks Based on Bat Optimization Algorithm

LI Shuangshuang^a, YANG Wenzhong^a, WU Xiangqian^a, SHI Yan^b, GAO Qiutian^b

(a. College of Information Science and Engineering; b. School of Software, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

【Abstract】 In order to solve the hot pot problem which is caused by uneven load energy of cluster head node in Wireless Sensor Network (WSN), this paper proposes a partition routing protocol based on multiple sinks. It deploys multiple sinks and makes a reasonable partition in monitoring area, and uses the bat optimization algorithm which leads into variable scale chaos strategy to select the appropriate cluster head nodes to avoid the local optimization of bat algorithm. In data transmission phase, the cluster head node chooses the remaining energy greater than the average energy and the nearest node from the base station as the next hop. Simulation results show that compared with LEACH protocol and DEBUC protocol, the proposed protocol can reduce and balance energy consumption, increase the amount of packet reception, and extend the network lifetime.

【Key words】 Wireless Sensor Network (WSN); routing protocol; bat optimization algorithm; cluster; energy efficiency

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0046325

0 概述

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 由许多具有感知、计算和无线通信能力的节点组成。节点具有体积小、重量小、功率以及能量受限等特点。传感器节点将收集的信息传输到基站, 应用于交通、医疗和家居等领域。多数廉价的节点是通过电池供电, 容易部署, 但在通常情况下, 电池不易更换或充电, 能量有限。因此, 在 WSN 中, 设计一种能提高节点能量使用效率的路由协议非常重要^[1]。

本文提出一个基于蝙蝠优化算法的多基站分区

路由协议。为缓解“热区”问题, 通过部署多个基站对网络进行合理的分区, 采用引入变尺度混沌策略的蝙蝠优化算法寻优选择合适的节点作为簇头节点。在数据传输阶段, 过滤选择出剩余能量大于平均能量的邻居节点集, 并采用贪心思想选取离基站最近的邻居作为下一跳, 直到基站收到数据包。

1 背景介绍

为了解决平面路由协议中所有节点直接把数据包发送给基站时消耗过多能量的问题, 层次路由协议通过分簇的方式, 减少直接向基站发送数据包的

基金项目: 国家自然科学基金 (61262087, U1603115)。

作者简介: 李双双 (1992—), 女, 硕士研究生, 主研方向为无线传感器网络、路由协议、物联网; 杨文忠, 副教授、博士; 吴向前, 教授、博士; 石 研、高秋田, 硕士研究生。

收稿日期: 2017-03-13 **修回日期:** 2017-05-22 **E-mail:** ywz_xy@163.com

节点数量^[2]。经典的低功耗自适应集簇分层协议 (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH)^[3] 采用自适应分簇策略,没有考虑节点的能量。此外,该协议中全部簇头节点直接向基站发送数据包,消耗过多能量,影响整个网络生存周期。

目前,针对 LEACH 协议存在的问题,业界提出了很多基于 LEACH 的改进协议。文献[4]提出一种响应式分布分簇算法 (Responsive Distributed Clustering Algorithm, RDCA)。RDCA 根据网络局部拓扑信息选择簇头节点,但没有考虑节点的能量。针对分簇算法中簇头节点向基站发送数据包存在的问题,文献[5]根据节点的位置信息与能量信息选择合适的转发节点,有效降低了网络能耗,但每个节点都要存储其他节点的位置和能量信息,存在存储代价较大的问题。文献[6]通过引入簇成员数阈值约束簇的数量,并且合并极小簇避免簇规模过小,但该算法存在某些簇成员数量过多和“热区”问题。文献[7]根据密度以及相对距离选择合适的节点作为簇头节点,并根据预测消耗的能量、跳数以及延迟值,用蜂群优化算法寻找合适路由。

针对均匀分簇存在的“热区”问题,一些文献转而研究了非均匀分簇。文献[8]提出了一种基于分区自感簇头的数据传输机制,选择射频信号发射最强的节点作为簇头节点,并且根据能量阈值以及轮询时间选择备用簇头,但没有考虑距离因素。文献[9]通过参考邻居簇头的能量、簇内及簇间通信代价,选取最好的中继节点作为下一跳。该算法通过控制候选簇头的竞争范围,缓解“热区”问题,但存在有些簇成员规模过大、消耗过多能量的问题。

群体智能优化算法是一种新兴的优化方法,在无线传感器网络路由以及节点定位中有着很好的应用^[10]。文献[11]提出了一种基于粒子群算法的节能分簇路由协议,根据节点的能量以及距离选择合适的簇头节点,但存在数据传输方式不合理的问题。文献[12]采用自组织映射神经网络和萤火虫算法进行分簇,有效地延长了网络的生存周期。文献[13]根据节点与基站的距离远近对网络区域进行划分,标记等级,采用改进的粒子群算法在等级相同的区域智能搜索聚类,均衡了能量消耗,解决了网络热区问题。文献[14]应用二型模糊逻辑算法选择簇头节点,在数据传输时,采用蚁群算法选择最优的下一跳节点。文献[15]提出了蝙蝠算法 (Bat Algorithm, BA),该算法具有并行性、分布式、收敛速度快等特点,已经广泛应用于各领域。但蝙蝠算法存在后期收敛速度慢、易陷入局部最优的问题。

2 网络与能耗模型

2.1 网络模型

针对周期性地监测某个区域中数据的应用,本文对网络模型做出一般性假设:区域为矩形,节点随

机分布。

模型具体描述如下:

- 1) 4个基站部署在监测区域的4个中心处,且位置固定,能量不受限。
- 2) 所有节点随机均匀的分布。
- 3) 所有节点具有唯一标识,能量受限。
- 4) 节点能通过计算得到剩余能量。
- 5) 节点的通信能力相同且通信功率受限。

描述3)是针对 WSN 中存在离基站近的节点消耗过多能量的“热区”问题,在网络初始化部署时,通过在监测区域4个中心位置部署4个基站,从而有效缓解此问题,其余几条则是 WSN 的典型设置。

2.2 能耗模型

参考经典的分簇路由 LEACH 协议,本文使用 WSN 中一般的通信能耗模型,计算节点通信的能耗,模型如图1所示。



图1 能量消耗模型

当发送 k bit 数据、传输距离 d 时,所消耗的能量为:

$$E_{TX}(k, d) = E_{TX-elec}(k) + E_{TX-amp}(k, d) = \begin{cases} kE_{elec} + k\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ kE_{elec} + k\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, E_{elec} 为发射电路的能耗, ϵ_{fs} 、 ϵ_{mp} 为自由空间模型和多径衰减模型功率放大的能耗^[16]。

节点接收 k bit 数据,消耗的能量为:

$$E_{RX}(k) = E_{RX-elec}(k) = kE_{elec} \quad (2)$$

为了减少网络中的冗余数据,本文采用了数据融合,也会消耗一部分能量。融合 n 个 k bit 数据所消耗的能量为:

$$E_u = k \cdot n \cdot E_{DA} \quad (3)$$

其中, E_{DA} 表示融合一个 1 bit 数据所消耗的能量。

3 蝙蝠优化算法

由于蝙蝠算法具有并行性、分布式、收敛速度快等优点,已经广泛应用于 WSN 定位方面的研究^[17]。为了解决分簇路由协议中簇头节点选择不合理影响网络生存周期的问题,本文考虑将蝙蝠算法应用于簇头选择阶段。但是蝙蝠算法存在易陷入早熟收敛的问题,因此引入变尺度混沌变换对其进行改进,使得簇头选择更合理。

蝙蝠算法通过设定适应度函数,使得每一只蝙蝠都有一个自身的相应值,然后通过调整算法中的一些参数,在所有解中根据目前的最优值逐渐寻找到的最优值^[18]。该算法的具体步骤如下:

- 1) 蝙蝠可以通过回声定位感知距离,并且蝙蝠有能力在黑暗中识别物体。

2) 蝙蝠初始位置为 x_i , 随机飞行速度为 v_i , 以频率 f_{\min} 、波长 λ 搜索猎物。当蝙蝠发现猎物时, 可以根据目标位置以及与目标的远近程度来调整脉冲波长和发射率 γ 。

蝙蝠算法的工作流程如图 2 所示。

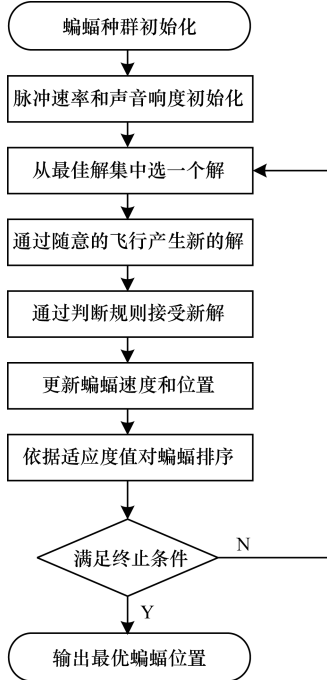


图 2 蝙蝠算法的工作流程

针对蝙蝠算法存在后期收敛速度慢且易陷入局部最优的问题, 引入变尺度混沌策略对其改进。在分簇路由协议中, 采用改进蝙蝠算法优化簇头选择。混沌优化算法利用混沌内随机性、初值敏感性和遍历性的特点, 保持蝙蝠个体多样性, 避免算法陷入局部最优, 从而提高全局搜索能力^[19]。

本文引用 Sinusoidal 混沌映射^[20], 公式如下:

$$u_{k+1} = a \cdot u_k^2 \sin(\pi \cdot u_k) \quad (4)$$

对式(4)中的混沌变量进行变尺度变换^[21]:

$$u_{k+1} = \tau \cdot a \cdot u_k^2 \sin(\pi \cdot u_k) \quad (5)$$

其中, $\tau = \sqrt{\frac{t}{t_{\max}}}$, t 是当前迭代次数, t_{\max} 是最大迭代次数。

在迭代过程中, 对参数脉冲频度增加系数 γ 引入变尺度混沌变换, 则有:

$$\gamma_{\text{new}} = \tau \cdot \gamma_{k+1} \quad (6)$$

通过引入变尺度混沌扰动, 增加了蝙蝠种群的多样性, 有效改善了蝙蝠算法易陷入局部最优的问题, 进而优化簇头选择阶段, 延长网络的生命周期。

4 基于蝙蝠优化算法的多基站分区路由协议

基于蝙蝠优化算法的多基站分区路由协议 (Partition routing protocol with Multiple sinks based on Bat optimization Algorithm, PMBA) 分为 3 个阶

段: 1) 网络初始化阶段, 在监测区域 4 个中心位置部署 4 个基站, 并且通过矩形非均等的划分区域, 在一定程度上缓解离基站近的簇头节点的数据转发量; 2) 簇头选择阶段, 采用引入变尺度混沌策略的蝙蝠优化算法选择最优的簇头节点; 3) 数据传输阶段, 在贪心选择离基站最近的邻居节点前, 先将剩余能量小于平均能量的邻居过滤掉, 以减少能量少的节点参与数据转发程度。

4.1 网络初始化阶段

初始化阶段建立一个矩形网络代表监测区域, 模型如图 3 所示, 2 个对边中点的连线将矩形网络分成了大小相等的 4 个部分。其中在小矩形网络的中心处部署基站, 缓解大规模 WSN 中节点能量消耗过多的问题。以基站所在位置为中心, 边长为 a_i ($i = 1, 2, \dots$) 的矩形 S_i ($i = 1, 2, \dots$) 将 4 个小矩形分成了大小不均等的小区域, 其中边长 a_i 满足 $a_i = i \cdot a_1$ 。

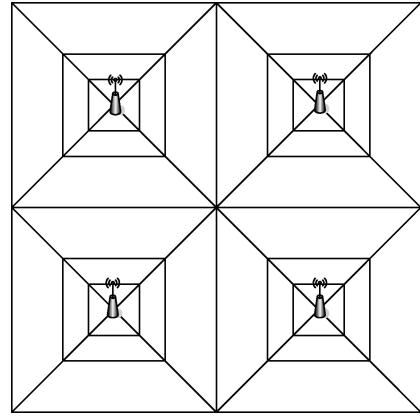


图 3 PMBA 分区模型

设监测区域边长为 M , 矩形 S_1 的边长 $a_1 = a$, 则以基站为中心的矩形监测区域中矩形的个数 i 满足:

$$i = \frac{M}{2a} \quad (7)$$

S_i 把以基站为中心的矩形分成 $4i$ 个区域。

设整个矩形网络被分成了 k 个区域, 那么 k 满足:

$$k = \frac{8M}{a} \quad (8)$$

假设该网络中有 N 个节点。根据图 1 的模型, 网络中 K 个簇消耗能量为^[22]:

$$E_{\text{Total}} = K \left(E_{\text{head}} + \frac{N}{K} E_{\text{no_head}} \right) = K \times (E_{\text{elec}} N + E_{\text{DA}} N + K \varepsilon_{\text{mp}} d_{\text{toBS}}^4) + E_{\text{elec}} N + \varepsilon_{\text{fs}} N d_{\text{tohead}}^2 \quad (9)$$

其中, d_{tohead}^2 的期望为:

$$E[d_{\text{tohead}}^2] = \iint (x^2 + y^2) \rho(x, y) dx dy = \rho \int_0^{2\pi} \int_0^{\sqrt{\frac{M \times M}{\pi k}}} r^3 dr d\theta = \frac{M^2}{2\pi k} \quad (10)$$

根据式(9)和式(10), 可得出:

$$E_{\text{Total}} = K \times \left(2NE_{\text{elec}} + NE_{\text{DA}} + K\varepsilon_{\text{mp}}d_{\text{toBS}}^4 + N\varepsilon_{\text{fs}} \frac{M^2}{2\pi K} \right) \quad (11)$$

根据式(11),可以得出 K 的最优取值为:

$$K_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{N}{2\pi}} \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{fs}} \times M^2}{\varepsilon_{\text{mp}} d_{\text{toBS}}^2}} \frac{1}{d_{\text{toBS}}} \quad (12)$$

根据式(8)和式(12),令 $k = K_{\text{opt}}$,可推导出矩形 S_1 的边长 a 的最优取值如下:

$$a = \frac{8\sqrt{2\pi\varepsilon_{\text{mp}}d_{\text{toBS}}^2}}{\sqrt{N\varepsilon_{\text{fs}}}} \quad (13)$$

根据式(13),可以得到初始化分区的参数 a 的最优取值。通过部署4个基站以及对监测区域进行的不均等的划分,缓解了离基站距离近的簇头节点易死亡的“热区”问题。

4.2 簇头选择阶段

PMBA 路由协议在簇头选择阶段,采用引入变尺度混沌策略的蝙蝠优化算法选取最优簇头节点。

4.2.1 适应度函数的设置

在 WSN 中,能量、距离以及密度都是影响选择簇头的重要因素。因此,PMBA 协议将适应度函数设置为:

$$f(x) = \alpha \cdot E_i + \beta \cdot D_i + \gamma \cdot S_i \quad (14)$$

其中,能量因素 E_i 、距离因素 D_i 和密度因素 S_i 分别为:

$$E_i = \frac{E_{i\text{-current}}}{E_{\text{avg}}} \quad (15)$$

$$D_i = \frac{\text{Max}_{\text{to-BS}} - d_{i\text{-BS}}}{d_{\text{avg}}} \quad (16)$$

$$S_i = \frac{s_i}{s_{\text{max}} - s_{\text{min}}} \quad (17)$$

其中, $E_{i\text{-current}}$ 是节点 i 的能量, E_{avg} 是节点 i 所在区域的平均能量, $d_{i\text{-BS}}$ 是节点 i 与基站的距离, $\text{Max}_{\text{to-BS}}$ 是区域中节点 i 到基站的距离, d_{avg} 是区域中节点 i 到基站的平均距离, s_i 是节点 i 的邻居数, s_{max} 、 s_{min} 分别是邻居数的最大值和最小值。

α 、 β 、 γ 为选择簇头时调节能量、距离以及密度因素的权重参数,且满足 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。

4.2.2 簇头选择

PMBA 协议采用引入变尺度混沌策略的蝙蝠优化算法在区域中选取簇头节点,具体过程如下:

步骤1 网络初始化。

步骤2 根据式(14)算出蝙蝠的适应度值,对其排序,得到最优解。

步骤3 根据式(18)~式(20),对网络中的蝙蝠进行速度和位置的更新。

$$f_i = f_{\text{min}} + (f_{\text{max}} - f_{\text{min}}) \times \beta \quad (18)$$

$$v_i' = v_i^{t-1} + (x_i' - x^*) \times f_i \quad (19)$$

$$x_i' = x_i^{t-1} + v_i' \quad (20)$$

其中, β 是在 $[0,1]$ 上均匀分布的随机数, f_i 代表了蝙蝠 i 的搜索脉冲频率,范围在 $[f_{\text{min}}, f_{\text{max}}]$ 上, v_i' 、 v_i^{t-1} 分别代表蝙蝠 i 在 t 时刻和 $t-1$ 时刻的速度, x_i' 、 x_i^{t-1} 分别表示蝙蝠 i 在 t 时刻和 $t-1$ 时刻的位置, x^* 表示当前所有蝙蝠中的最优解。

步骤4 创建一个随机数 rand_1 ,若 rand_1 大于 r ,就对目前的最优解进行随机扰动,产生一个新的解取代之前的最优解。

步骤5 创建一个随机数 rand_2 ,若 rand_2 大于 A_i 且 $f(x_i) < f(x^*)$,则按照式(21)、式(22),对步骤4中产生的新解中的 r 和 A_i 进行更新。

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \quad (21)$$

$$r_i^{t+1} = R_0 [1 - \exp(-\gamma_{\text{new}} t)] \quad (22)$$

其中, A_i^{t+1} 和 A_i^t 代表蝙蝠 i 在 $t+1$ 时刻和 t 时刻的脉冲音强, α 代表脉冲音强衰减系数且满足 $\alpha \in [0,1]$, r_i^{t+1} 代表蝙蝠 i 在 $t+1$ 时刻的脉冲频率, R_0 代表蝙蝠 i 的最大脉冲频率, $\gamma_{\text{new}} = \tau \cdot u_{k+1}$ 。

步骤6 把网络中所有的蝙蝠适应度值按照从大到小顺序排列,找到最大值以及对应的位置,就是要找当前最优解和最优值。

步骤7 重复执行步骤2~步骤5,直到满足设定的最优解条件或达到最大迭代次数。

步骤8 输出全局最优值和最优解。

4.3 数据传输阶段

PMBA 中簇内节点直接向簇头发送数据包。然后簇头进行数据融合,在剩余能量大于平均能量的邻居节点中,选择离基站最近的节点作为下一跳。

PMBA 协议数据传输算法伪代码如下。

算法1 数据发送

For every cluster node

Forwarding (data) to it's CH node directly;

End

For every CH node

Receiving the data and Data fusion;

Forwarding (data) to nextNode according FIND-NEXT;

End

算法2 下一跳簇头发现

For every CH node Ni

If EnergyNj > AverageEnergy && dis(Nj, BS) < dis(Ni, BS) && dis(Ni, Nj) < Communication radius(i)

nextNode = Nj;

Else

Forwarding (data) to BS directly;

End

End

如图4所示,2号、4号、5号以及6号簇头节点找不到合适的下一跳,则直接将数据包发送给基站,避免将其发送给其他离基站远的邻居节点,从而造成路径迂回、能量消耗,以及传输时延的增大。1号

簇头找到离基站更近的 2 号邻居簇头,并且满足 2 号目前剩余的能量大于簇头剩余能量的平均值,于是 1 号将数据包转发给 2 号;3 号和 7 号簇头找到离基站最近的 5 号邻居,并且满足剩余能量大于平均值,于是 3 号和 7 号将数据包转发给 5 号。

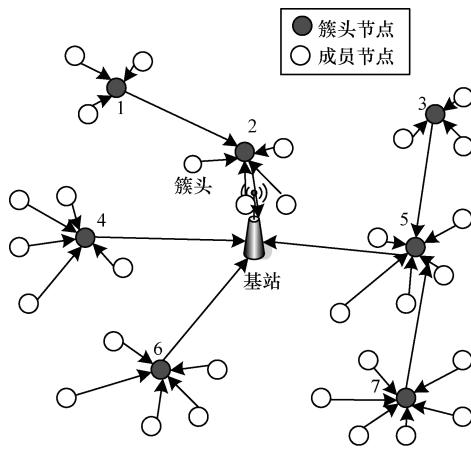


图 4 簇间数据传输示意图

5 实验设置与结果分析

为了验证 PMBA 协议的性能,将与经典的 LEACH 协议以及 DEBUC 协议作对比。实验环境描述如下:采用 Windows 32 位系统,4 GB 内存大小,500 GB 硬盘的计算机,Matlab 2013b 为仿真工具。参考指标为:节点存活数,节点平均剩余能量,以及数据包接收量。参数设置如表 1 所示。

表 1 参数设置

参数	取值
区域面积/ m^2	200×200
节点数	200
基站坐标	$(50, 50), (50, 150), (150, 50), (150, 150)$
初始能量/J	1
仿真轮数	5 000
光吸引强度系数	1.0
发送/接收电路能耗/ ($\text{nJ} \cdot \text{bit}^{-1}$)	50
数据包大小/bit	4 000
控制数据包大小/bit	200
放大器能耗 ε_{fs} ($\text{pJ} \cdot \text{bit}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)	10
放大器能耗 ε_{mp} ($\text{pJ} \cdot \text{bit}^{-1} \cdot \text{m}^{-4}$)	0.001 3
步长因子	2

使用 Matlab 仿真工具定义一个 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 的矩形作为监测区域。采用随机模型部署 200 个节点,如图 5 所示,小圆圈代表节点,带问号的框代表基站。

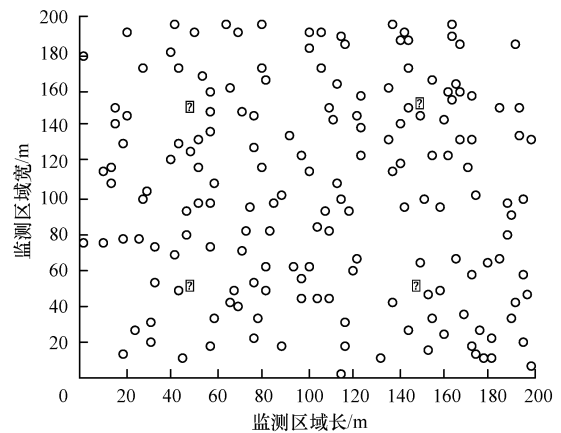


图 5 节点分布

根据 LEACH、DEBUC 以及 PMBA 的设计思想,使用图 1 的模型,在 Matlab 仿真工具中进行对比。图 6 是对 3 种协议节点存活数量的对比结果。LEACH 协议在 2 000 轮时,节点存活个数为 0;约 3 000 轮时,DEBUC 节点存活个数为 0,而 PMBA 在 3 000 轮时,60% 的节点仍然存活,表明了 PMBA 协议通过分区、蝙蝠优化算法使得簇头选择更合理,并且在数据传输时减少能量少的节点的参与度,有效地延长了网络的生存周期。

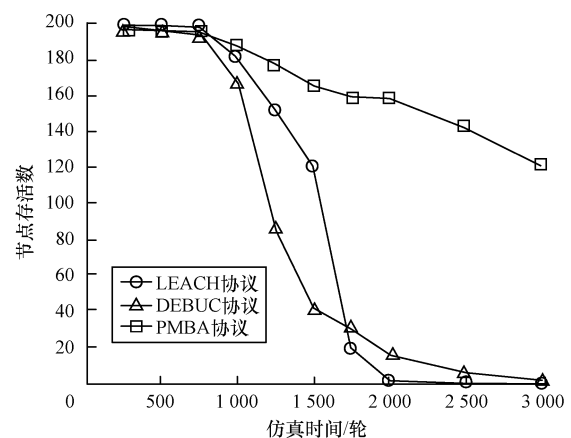


图 6 不同协议的节点存活数目比较

图 7 所示为 LEACH、DEBUC 以及 PMBA 的节点剩余平均能量的对比结果。PMBA 的节点平均能量明显大于 LEACH 和 DEBUC,表明 PMBA 协议在设置适应度函数时考虑能量因素并根据簇头节点能量调节数据转发参与度,减少了节点的能量消耗。

图 8 为 LEACH、DEBUC 以及 PMBA 的平均剩余能量方差的对比结果。由于随机选择簇头,LEACH 协议的平均剩余能量方差比 DEBUC 和 PMBA 大很多,且变化最明显。而 PMBA 协议通过部署多个基站并且合理地分区使得节点能量消耗更均衡,因此方差最小且变化不大。

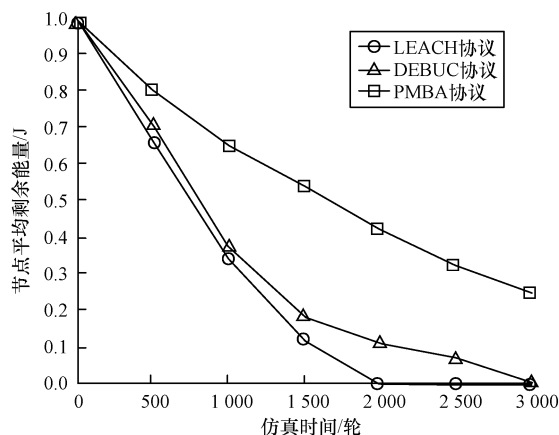


图7 不同协议的节点平均剩余能量比较

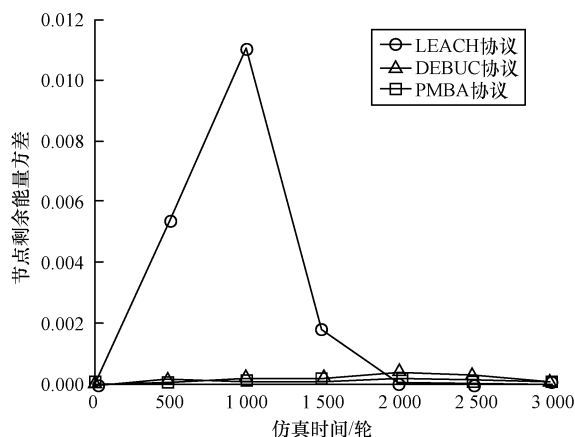


图8 不同协议的节点剩余能量方差比较

图9是LEACH协议、DEBUC协议以及PMBA协议数据包接收量的对比。由图9可以看出,PMBA协议数据包接收量最多,表明在数据传输阶段,在选择下一跳时,相比于距离的合理性,优先考虑能量,可以减少丢包率,提高数据交付率。

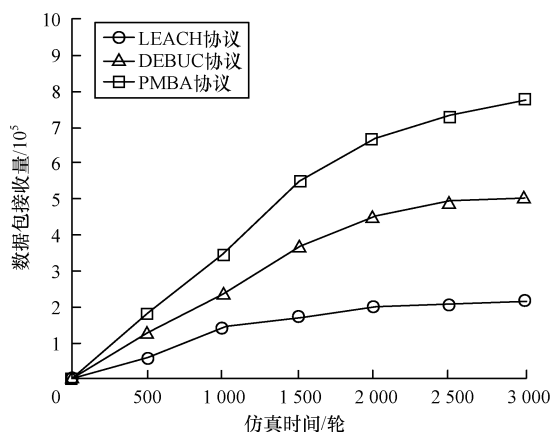


图9 不同协议的接收数据包数量比较

6 结束语

针对WSN分簇路由协议存在簇头选择以及数据传输方式不合理的问题,本文提出了一个基于引入变

尺度混沌策略的蝙蝠优化算法的多基站分区路由协议PMBA。PMBA通过部署4个基站以及对监测区域的合理划分,能有效缓解“热区”问题。采用蝙蝠优化算法使簇头选择更加合理,此外,当数据传输时,过滤掉低于平均能量的邻居节点后再根据距离选择下一跳节点。实验结果表明,与LEACH协议以及DEBUC协议相比,PMBA协议有效地延长了网络的生存周期,降低了能量消耗的同时均衡了网络的能耗并且数据包接收率也有了一定的提高。设置节点休眠机制减少能量消耗是下一步的研究工作。

参考文献

- [1] 唐勇,周明天,张欣.无线传感器网络路由协议研究进展[J].软件学报,2006,17(3):410-421.
- [2] ABBASI A A, YOUNIS M. A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks[C]//Proceedings of International Conference on Network-based Information Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 358-364.
- [3] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless micro sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4):660-670.
- [4] 胡静,沈连丰,宋铁成,等.新的无线传感器网络分簇算法[J].通信学报,2008,29(7):20-26.
- [5] 郭书城,卢昱,许定根.基于分簇无线传感器网络的路由算法研究[J].通信学报,2010,31(S1):63-69.
- [6] 吕涛,朱清新,张路桥.一种基于LEACH协议的改进算法[J].电子学报,2011,39(6):1405-1409.
- [7] ZHANG Degan, WANG Xiang, SONG Xiaodong, et al. A new clustering routing method based on PECE for WSN[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking, 2015(1):1-13.
- [8] 石云,陈钟,孟显勇.基于分区自感簇头的无线传感网数据稳定传输机制[J].计算机工程,2016,42(11):102-108.
- [9] 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,2013,34(5):1222-1232.
- [10] 赵吉.群体智能算法研究及其应用[D].无锡:江南大学,2010.
- [11] 蒋畅江,石为人,向敏,等.基于PSO的无线传感器网络节能分簇协议[J].计算机工程,2010,36(8):15-17.
- [12] 刘奇奇,张曦煌.基于萤火虫算法的无线传感器网络的分簇路由协议[J].传感器与微系统,2015,34(9):114-116.
- [13] 李洪兵,余成波,闫俊辉,等.基于改进粒子群聚类的无线传感器网络能量均衡分簇策略[J].计算机应用研究,2011,28(2):657-660.
- [14] XIE Weixian, ZHANG Qiye, SUN Zeming, et al. A clustering routing protocol for WSN based on type-2 fuzzy logic and ant colony optimization[J]. Wireless Personal Communications, 2015, 84(2):1165-1196.

(下转第92页)

4 结束语

本文提出一种基于 DFT 和二次多项式拟合的载波频率和相位联合估计算法,并针对该算法的局限性给出了改进方案,同时借助非数据辅助的方式,对该算法在 FTN 传输系统中的特性进行了仿真测试。仿真结果表明,在压缩因子的门限范围内,二次多项式拟合法能够更好地适应信号 FTN 信号的 ISI 特性,不会因为压缩因子的减小而出现明显的性能恶化。通过改进 1 和改进 2,可以进一步提升二次多项式拟合法的性。在改进 1 的方案中,性能在 $N = 4L$ 时基本趋于稳定,频率估计性能与改进二相当,前者虽然具有较大的运算量,但是在相位估计中,该改进方法性能更稳定,估计更精确。

参考文献

- [1] 徐 洋,郭明喜,沈越泓,等.一种 FTN 系统下预测型判决反馈均衡器[J].无线电通信技术,2016,42(5):56-59,63.
- [2] BANELLI P, BUZZI S, COLAVOLPE G, et al. Modulation formats and waveforms for 5G networks: who will be the heir of OFDM?: an overview of alternative modulation schemes for improved spectral efficiency[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(6):80-93.
- [3] 丁玉杰,孙锦华.低信噪比短突发通信系统下载波频偏估计算法研究[D].西安:西安电子科技大学,2014.
- [4] 张广娜,郭明喜,沈越泓.FTN 系统中的低复杂度接收技术比较[J].通信技术,2016,49(8):960-967.
- [5] 龚 超,张邦宁,郭道省.基于 FFT 的快速高精度载波参数联合估计算法[J].电子学报,2012,38(4):767-770.
- [6] 胡景明,叶 展,张邦宁.基于三角多项式插值的频率和相位联合估计算法[J].数据采集与处理,2014,29(3):431-438.
- [7] 周新力,龚岳洲,孙小东,等.一种低复杂度的频偏估计算法[J].计算机工程,2013,39(3):128-131,145.
- [8] 汪 文,冷 文,王安国,等.一种数据辅助频偏估计算法[J].计算机工程,2014,40(4):112-115.
- [9] RIFE D C, Boorstyn R R. Single-tone parameter estimation from discrete-time observation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1974, 20(5):591-598.
- [10] QUINN B G. Estimating frequency by interpolation using fourier coefficients[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 28(2):113-112.
- [11] MACLEOD M D. Fast nearly ML estimation of the parameters of real or complex single tones or resolved multiple tone[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(1):141-148.
- [12] JACOBSEN E, KOOTSOOKOS P. Fast, accurate frequency estimators[J]. IEEE Signal Process, 2007, 24(3):123-125.
- [13] CANDAN C. A Method for fine resolution frequency estimation from three DFT samples[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(6):351-354.
- [14] LIANG Xiaohu, LIU Aijun, PAN Xiaofei, et al. A new and accurate estimator with analytical expression for frequency estimation[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(1):105-108.
- [15] JOHN B A. A review of faster than nyquist signaling with an extension to four-level modulation[C]//Proceedings of International Symposium on Turbo Code & Iterative Information Processing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016:6-10.
- [16] KAY S M. Fundamentals of statistical signal processing[M]. New Jersey, USA: MIT Press, 1993.
- [15] YANG Xinshe. Bat algorithm for multi-objective optimization[J]. International Journal of Bio-inspired Computation, 2011, 3(5):267-274.
- [16] 苏 兵,唐 明,宋 戈,等.一种基于功率控制的 WSN 分簇路由算法研究[J].测控技术,2015,34(9):95-98.
- [17] 王战备.基于蝙蝠算法的无线传感器网络节点定位[J].计算机工程与应用,2014,50(11):90-94.
- [18] 李 煜,马 良.新型全局优化蝙蝠算法[J].计算机科学,2013,40(9):225-229.
- [19] 黄美灵,赵之杰,浦立娜,等.基于自适应 Tent 混沌搜索的粒子群优化算法[J].计算机应用,2011,31(2):485-489.
- [20] GANDOMI A H, YANG Xinshe, TALATAHARI S, et al. Firefly algorithm with chaos[J]. Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation, 2013, 18(1):89-98.
- [21] 刘琼荪,孙喜波.变尺度混沌算法的 BP 网络优化[J].计算机应用研究,2011,28(4):1257-1259.
- [22] RAGHUVANSHI A S, TIWARI S, TRIPATHI R, et al. Optimal number of clusters in wireless sensor networks: an FCM approach[C]//Proceedings of International Conference on Computer and Communication Technology. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 817-823.

编辑 刘 冰

编辑 顾逸斐

(上接第 85 页)