

基于多态蚁群算法的 WSN 能耗均衡路由协议

常 薇, 刘才兴, 林惠强, 房能沛

(华南农业大学信息学院计算机系, 广州 510642)

摘要: 针对无线传感器网络(WSN)的能耗均衡问题, 提出一种基于多态蚁群算法的路由协议, 采用周期传输和数据融合的方式, 将无线传感器节点的剩余能量信息融合到信息素的形成中。仿真实验表明, 与 Leach 协议相比, 采用该协议有 82% 的节点生命周期更长, 在相同时间内网络可多传输 48% 的数据包。在实验室使用 31 个节点部署无线传感器网络, 将路由协议应用于网络。实验结果验证了该协议的有效性。

关键词: 多态蚁群; 能耗均衡; 无线传感器网络; 路由协议

Balanced Energy Consumption Route Protocol Based on Polymorphic Ant Colony Algorithm for WSN

CHANG Wei, LIU Cai-xing, LIN Hui-qiang, FANG Neng-pei

(Department of Computer, College of Informatics, South China Agriculture University, Guangzhou 510642)

【Abstract】 Aiming at the problem of balanced energy consumption in Wireless Sensor Network(WSN), a route protocol is proposed based on polymorphic ant colony algorithm. It integrates the spare energy information of the nodes into their pheromone construction, adopting the technology of cycle transmission and data fusion. Simulation experiments show that compared with Leach protocol, adopting the proposed protocol, eight-two percent of the nodes have longer life cycle and forty-eight percent more data packets can be transmitted. The proposed protocol is implemented in a real WSN with thirty-one nodes. Experimental results confirm the validity of the protocol.

【Key words】 polymorphic ant colony; balanced energy consumption; Wireless Sensor Network(WSN); route protocol

1 概述

在无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的体系结构中, 网络层的路由技术对 WSN 性能具有重要的影响^[1]。由于 WSN 资源有限且与应用高度相关, 研究人员通常采用多种策略设计路由协议^[2]。高效利用能量是路由设计的要点; 其次针对节点易失效的特点, 采用多路径机制^[3]。目前, 对 WSN 路由协议的研究主要集中在如何有效节省网络能耗方面。多数协议采用分簇的方法进行网络拓扑管理, 虽然分簇的管理机制能有效地协调和节省网络的能耗, 但是这种集中式成簇开销较大, 而且限制了网络的扩展性。因此, 需要进一步研究新的路由技术^[4]。蚁群算法已经成功地应用于解决 TSP 等许多优化问题。在多态蚁群算法中, 为了避免蚂蚁搜索子空间规模太大的问题, 引入多种蚁群, 使每种蚁群只需在自己的搜索空间内查找, 这不仅可以大大缩减搜索空间的规模, 而且选择的效率(位于最优路径上)也较高, 从而使搜索、收敛速度大大提高^[5]。

本文设计了一种基于多态蚁群的能耗均衡路由协议(Balanced Energy Consumption Routing Protocol for WSN Based on Ant Colony, Ant-BECP), 通过不同种类的蚂蚁分工合作的方式探寻网络的拓扑结构, 构建路径树, 建立备选路径表集, 并将节点的剩余能量信息融入到信息素的形成中, 使各传感器节点的能量均衡消耗, 从而达到最大化延长网络生命周期的目的。

2 基于多态蚁群算法的 WSN 能耗均衡路由协议

2.1 WSN 能耗均衡路由

借鉴多态蚁群的思想, 在 Ant-BECP 协议中设置 2 种类

型的蚂蚁, 即侦查蚁和搜索蚁。利用侦查蚁获得网络的拓扑结构, 建立基于节点跳数的路径树, 同时构建备选路径集(MAXNODE); 利用搜索蚁完成数据的传输工作。本协议采用蚂蚁周期探路的方式更新网络拓扑结构。每个周期的运行分为 2 个阶段: 蚂蚁探路阶段和数据传输阶段。

2.2 蚂蚁探路拓扑的形成

在 WSN 初始阶段, 需要获取整个网络的拓扑结构。基站(sink)的能量通常认为是无限大的, 由 sink 派出侦查蚁, 负责侦查整个网络的拓扑结构。当侦查蚁遍历所有的节点后, 完成了一个探路周期 T , 并形成了以 sink 为根节点的基于节点跳数的路径树。路径树的定义如下。

无线传感器网络用有向图 $G = \langle V, E \rangle$ 表示, V 是节点集, E 是边集。对于 $v_k, v_l \in V$, $e_{kl} = \langle v_k, v_l \rangle \in E$, 当且仅当传感器 v_k 和 v_l 能够进行通信。蚂蚁探路后, 网络所形成的路径树可用 $Tree = \bigcup_{s=1}^S b^{(s)}$ 表示, 其中, $b^{(s)} = v_1^{(s)} v_2^{(s)} \dots v_{n_s}^{(s)}$, $s = 1, 2, \dots, S$ 是构成路径树 $Tree$ 的 S 个树枝, 且满足以下规则:

- (1) $v_{n_s}^{(s)} = \text{sink}$;
- (2) $v_k^{(i)} v_{k+1}^{(i)} \in E, k = 1, 2, \dots, n_s - 1$;
- (3) 若 $k \neq l$, 则 $v_k^{(i)} \neq v_l^{(i)}$;

基金项目: 国家“863”计划基金资助项目(2006AA10Z246)

作者简介: 常 薇(1979—), 女, 讲师、硕士, 主研方向: 无线传感器网络, 嵌入式系统; 刘才兴, 教授; 林惠强, 讲师、硕士; 房能沛, 硕士研究生

收稿日期: 2009-09-10 **E-mail:** hscw98@163.com

(4)若 $v_k^{(i)} \in b^{(i)}$, 且 $\forall v_k^{(s)} \in b^{(s)}, \exists v_l^{(s)} \notin b^{(s)}$, 有 $e_{kl} = \langle v_k, v_l \rangle \in E, k \neq l$, 则 $v_k^{(i)} \notin b^{(j)}, i \neq j$ 。

侦查蚁在探路过程中, 节点和蚂蚁分别记录跳数、节点ID号等参数, 所形成的各条记录就成为数据传输的选择路径, 按照一定规则设定了备选路径表。备选路径表集用 $\{st\}$ 表示, H 表示跳数, d_{ij} 表示节点 i 与 j 的距离, $\{st\}_k$ 表示节点 k 的备选路径表, $b_k^{(s)}$ 表示节点 k 的备选路径, $b_k^{*(s)}$ 表示节点 k 的最优备选路径, 满足如下规则:

- (1) $\{st\} \subset Tree, \{st\}_k \subset \{st\}, b_k^{(s)} \subset \{st\}_k$;
- (2) $\forall k \neq l \neq l_1 \neq l_2 \neq \dots \neq l_n$, 对 $\forall v_k$, 若 $v_l \in b^{*(s)}, v_k \in b^{(s)} \notin b^{*(s)}, \dots, v_n \in b^{(s)} \notin b^{*(s)}$, $\exists e_{kl} = \langle v_k, v_l \rangle \in E, e_{kl_1} = \langle v_k, v_{l_1} \rangle \in E, \dots, e_{kl_n} = \langle v_k, v_{l_n} \rangle \in E$, 则 $H_{v_l} \leq H_{v_{l_1}}, H_{v_l} \leq H_{v_{l_2}}, \dots, H_{v_l} \leq H_{v_{l_n}}$;
- (3) $\forall k \neq l \neq j$, 若 $v_l \in b^{*(s)}, v_j \in b^{(s)} \notin b^{*(s)}, H_{v_l} = H_{v_j}$, 则 $d_{kl} \leq d_{kj}$ 。

2.3 数据传输

Ant-BECP 协议是一个由数据驱动的被动协议。本协议的数据传输阶段按照是否需要数据融合分为 2 种情况讨论。给出如下定义:

定义 1 对 $\forall v_k^{(s)} \in b^{(s)}, \exists v_l^{(s)} \notin b^{(s)}$, 有 $e_{kl} = \langle v_k, v_l \rangle \in E, k \neq l$ 成立, v_k 为叶子节点。

定义 2 对 $\forall v_f^{(s)} \in b^{*(s)}, \forall v_k^{(s)} \in b^{*(s)}$, 有 $e_{fk} = \langle v_f, v_k \rangle \in E$ 成立, 则 v_f 为 v_k 的父节点。

定义 3 定时片用于等待后续的子节点将采集到的数据包发过来融合。

当数据不需要融合处理时, 源节点查询自己的备选路径表 $\{st\}_k$, 根据转移概率选择路径直接转发数据包。当数据需要融合处理时, 只有父节点可以对自己接收到的一跳数据进行融合处理。具体融合过程如下: 当有一跳数据到达时, 父节点首先检查当前是否有定时片, 若有, 直接将数据包进行融合, 若当前没有定时片, 就为这个数据包分配一个定时片, 再等待其他一跳节点的数据到达。当定时片用完后, 将融合后的数据包传递给后继节点。此时的父节点动态被选为簇头, 它的所有一跳节点都是这个簇内的非簇头节点。

2.4 转移选择概率的计算

当节点 v_i 需要传输数据到节点 v_j 时, 节点 v_j 的剩余能量为 E_j , v_i 与 v_j 的距离为 d_{ij} , 比较每个 $b_k^{(s)}$ 中 v_i 与其后继节点的距离, 得到最小距离 \tilde{d}_{ij} 和最大距离 \hat{d}_{ij} 。计算产生:

$$\tau_{ij}(0) = CE_j \frac{\tilde{d}_{ij}}{\hat{d}_{ij}} \quad (1)$$

$$\tau_{ij}(t+1) = \begin{cases} \rho\tau_{ij}(t) + (1-\rho)\Delta\tau_{ij} & \text{被选中路径} \\ \rho\tau_{ij}(t) & \text{未选中路径} \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k = Q \frac{\tilde{d}_{ij}/d_{ij}}{L_{ij}} \left(\frac{E_j}{\sum E_{jk}} \right) \quad (3)$$

式(1)中, C 表示初始时刻信息素; Q 表示信息素强度; E_j 为所选路径上的后继节点当前能量; $\tau_{ij}(0)$ 是初始时刻路径上的信息素浓度, 由节点的剩余能量和最小距离与最大距离决定。式(2)中, ρ 表示信息素残留因子, 则 $1-\rho$ 表示信息素挥

发系数, $\rho \in [0,1)$ 。式(3)中, $\sum E_{jk}$ 表示从 sink 节点到当前节点的总消耗能量; d_{ij} 表示当前节点与后继节点的距离。节点剩余能量越大且总消耗能量越小, 则被选中的概率越大, 用 $E_j/\sum E_{jk}$ 表示; \tilde{d}_{ij}/d_{ij} 表示局部路径信息; L_{ij} 表示当前路径总长, 是全局信息, 将局部信息和全局信息相结合, 只在可能是最优解组成部分的路径上留下合适的信息素, 同时只在可能是最优解组成的路径上追加信息素浓度。启发函数 η_{ij} 表示蚂蚁对转移路径的期望程度, 考虑到节点之间的距离, 距离越近选择的可能性越大, 定义启发函数:

$$\eta_{ij}(t) = \frac{1}{L_{ij}} \quad (4)$$

最后, 用

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in allowed_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta} & \text{若 } j \in allowed_k \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (5)$$

计算得到各 $b_k^{(s)}$ 的转移概率 p_{ij} 。式(5)中的 α, β 分别表示 τ_{ij} 和 η_{ij} 的可调权重, 用于调节信息素浓度和启发函数的关系。该协议将 2 个节点间距及剩余能量融入信息素的形成中, 源节点以一定的概率选择后继节点, 因此, 数据包的传输路径不会总是沿着同一条路径, 达到了网络中能量均衡消耗的目的。

3 仿真与分析

3.1 Ant-BECP 协议的实现

Ant-BECP 协议 2 个阶段的流程分别如图 1、图 2 所示。

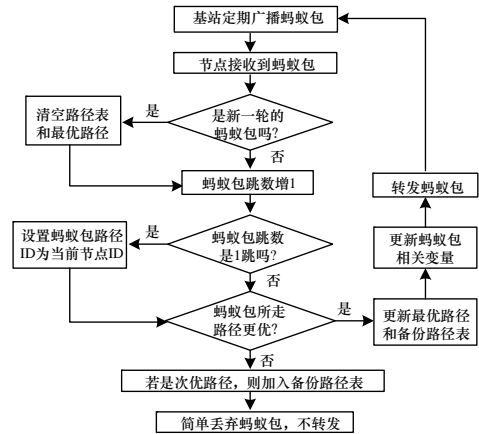


图 1 蚂蚁探路阶段的流程

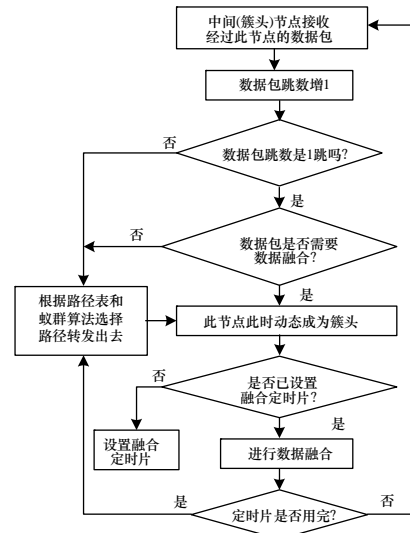


图2 数据传输阶段的流程

3.2 仿真与分析

在编写的仿真程序中假设采用理想的 MAC 协议，忽视无线链路中可能发生的丢包错误。主要考虑传感器节点发送、接收数据和进行数据融合所消耗的能量，统计了网络中的总剩余能量和存活节点数目来分析协议的能量效率。在每一种场景中，随机生成节点的位置坐标和随机数，对 Ant-BECP 协议、Leach 协议和 Ant-BECP-BestRoute 协议进行比较。Ant-BECP-BestRoute 协议是 Ant-BECP 协议的一个特例，其数据传输过程简化为直接选择备选路径中的最优路径来传输所有数据。为了保证实验结果的公平性和正确性，重复实验多次，然后把多次记录的结果求平均值进行比较。当网络中有 90% 的节点死亡时，认为网络已不存在，因此，生命周期的比较只取至网络中 90% 的节点死亡为止。在仿真过程中，参数的取值如下：

$$Q = 1, C = 0.5, \rho = 0.7, \alpha = 1, \beta = 1$$

具体的仿真条件设为：将 50, 100, 200, 300 个节点随机分布在 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 的正方形区域内，节点初始能量为 5 J, sink 节点位于 (0,0)，节点射频功率可控，启动数据融合。比较网络的生命周期和传输的数据包总量。

(1) 网络生命周期比较

在图 3 的环境中，当区域范围不变时，对于 Ant-BECP 协议，随着节点的增加，节点密度升高，节点备选路径数逐渐增多，网络的生命周期逐渐增大，平均有 82% 的节点死亡时间比 Leach 晚。但当节点密度达到一定程度后，Ant-BECP 协议的优势减弱，因为节点备选路径表已达到饱和状态。当节点密度大到使节点备选路径数足够多时，Ant-BECP 协议相对于 Ant-BECP-BestRoute 协议在延长网络生命周期方面优势更明显。

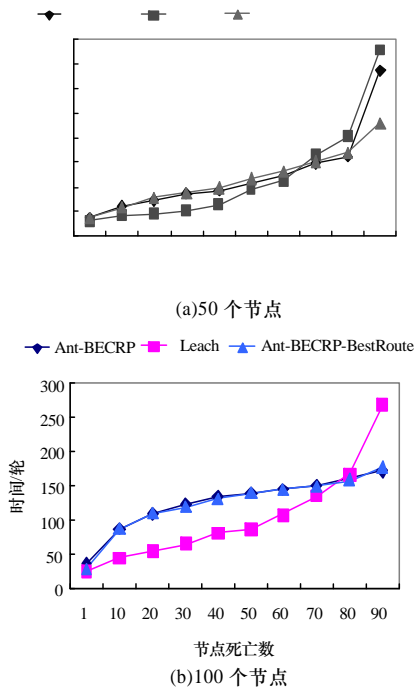


图3 节点数不同时网络生命周期比较

(2) 到达基站数据包的数量比较

在图 4 的仿真环境中，Ant-BECP 协议比 Leach 协议多传输 48% 的数据包，比 Ant-BECP-BestRoute 协议多传输 7% 的数据包。随着网络中节点数目的增多，节点间距离减小，

密度变大，节点备选路径数逐渐增多，Ant-BECP 协议的优势逐步增大，当节点备选路径表达到饱和状态，Ant-BECP 协议的优势逐渐减弱。

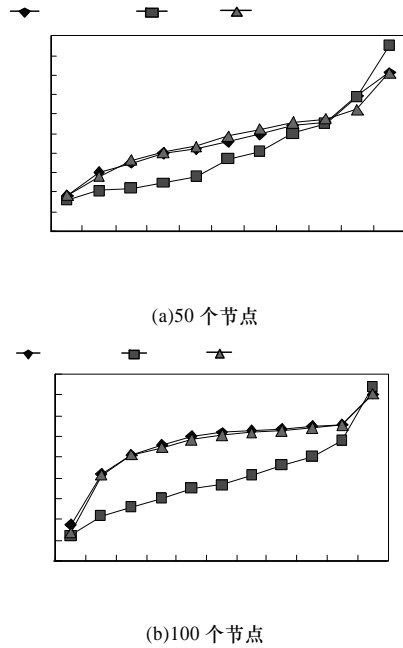


图4 节点数不同时传输的数据包总量比较

3.3 分析结果

通过仿真实验，Ant-BECP 协议平均有 82% 的节点死亡时间比 Leach 协议晚，同时能多传输 48% 的数据包。Ant-BECP 与 BestRoute 协议相比，网络的生命周期基本一致，但 Ant-BECP 协议更优，能多传输 7% 的数据包。

4 真实节点实验分析

本文利用 WSN 监控实验室各个角落的光强度，研究 Ant-BECP 协议在多节点多跳网络中的有效性和网络数据流量。实验采用宁波中科集成电路设计中心所开发的 GAINS-3 无线传感器网络节点，共 31 个，其中 1 个作为 sink 节点(基站)。sink 节点负责接收网络中其他 30 个节点定时采集的数据，同时将这些收集到的数据通过串口发送给无线传感器网络路由分析和管理可视化后台软件。可视化后台软件负责数据的可视化，实现数据的存储同时显示网络的拓扑结构。将 31 个节点部署到实验室，适当调整节点的射频功率(烧录程序前设置或软件实现)以形成多跳，经过多次部署和调整，最后的无线传感器网络的部署和拓扑结构如图 5 和图 6 所示。

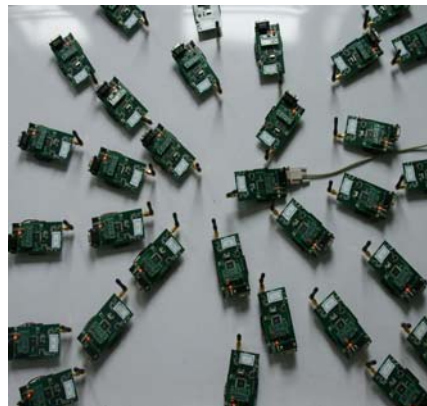


图5 网络节点的部署

(下转第 92 页)