

传感器网络中基于蚁群优化的数据查询协议^{*}

崔艳荣¹⁺, 李克清²

¹(长江大学 计算机科学学院,湖北 荆州 434023)

²(常熟理工学院 计算机科学与工程学院,江苏 常熟 215500)

Data Query Protocol Based on Ant Colony Optimization for Wireless Sensor Networks

CUI Yan-Rong¹⁺, LI Ke-Qing²

¹(School of Computer Science, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

²(School of Computer Science and Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China)

+ Corresponding author: E-mail: cyanr@tom.com, http://www.yangtzeu.edu.cn

Cui YR, Li KQ. Data query protocol based on ant colony optimization for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2010,21(4):793-801. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3509.htm>

Abstract: ACO (ant colony optimization) can find the optimal path from source nodes to sink nodes in data query for wireless sensor networks. But once all query tasks and query results are transmitted along the path, the energy of the path will be exhausted. So this paper puts forward an Energy Balance Data Query Protocol based on Ant Colony Optimization (EBDQ). This protocol rewards or punishes a path according to the energy consumption by pheromone decentralize energy consumption into different paths, and repositionally demotes the energy consumption of the whole network. Both theoretical analysis and simulation results show that EBDQ can prolong the lifetime and reduce the delay of the network.

Key words: wireless sensor network; routing trend guide; ant colony optimization; data query; pheromone

摘要: 在无线传感器网络的数据查询中,蚁群优化方法可以找到从源节点到目的节点的最优路径.但当所有的查询消息和查询结果都在这条路径上进行时,路径上的能量消耗会很大.因此,提出一种基于蚁群优化的能量均衡数据查询协议 EBDQ(energy balance data query protocol based on ant colony optimization),根据路径上的能量消耗情况,通过信息素对其进行奖惩,使网络的能量消耗分散在不同的路径上,让整个网络的能量平稳降级.理论分析和仿真结果都说明,EBDQ 协议能够提高传感器网络的生命周期,降低网络时延.

关键词: 无线传感器网络;路由趋势向导;蚁群优化;数据查询;信息素

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

无线传感器网络(wireless sensor network,简称 WSN)^[1-3]融合了传感器技术、分布式计算技术、无线通信技术和数据库处理技术,其主要功能是由节点采集物理信息,进行一定处理后传给汇聚节点,实现对物理世界的

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60573095 (国家自然科学基金); the Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China under Grant No.08KJD520012 (江苏省教育厅高校自然科学基金基础研究项目)

Received 2008-08-11; Accepted 2008-10-27

监测.由于传感器节点的资源有限,一般由电池供电且不能更新,如何高效地使用能量来最大化网络生命周期是传感器网络面临的首要挑战.数据查询协议是传感器网络中的关键问题之一,目前还没有一个统一的数据查询协议可以适应所有的传感器网络,针对不同的应用,设计出适合该应用的网络系统才能高效地解决问题.

蚁群优化(ant colony optimization,简称 ACO)^[4-8]是意大利学者 Dorigo 等人根据蚂蚁“寻找食物”的群体行为提出的一种性能优良的启发式随机优化算法,该算法采用正反馈机制实现分布式全局优化,通过信息素的不断更新达到最终收敛于最优路径上.蚁群算法用于求解复杂的组合优化等问题,获得了较好的效果.

现在有些学者将蚁群优化应用于无线传感器网络中,通过人工蚂蚁遍历网络节点来产生 sink 节点到达目标节点的最优路径.文献[9]提出了一种使用蚁群优化进行数据汇聚的集中式算法,与 PEGASIS(power-efficient gathering in sensor information systems)^[10]一样,它使用 MMAS(MAX-MIN ant system)^[11]算法将传感器节点构成链,从而达到节省能量的目的.它要求节点都可以互相通信,并可以与基站通信.文献[12]将蚁群优化应用到传感器网络中的数据汇聚中.文献[13]提出一种基于蚂蚁气味分析方法的蚁群优化用来在传感器网络中进行数据汇聚.文献[14]提出一种基于蚁群优化的能量高效机制来解决传感器网络中的覆盖问题.杨文国在文献[15]中首先将无线传感器网络的路由问题划成求解最小 Steiner 树问题,然后给出了求解无线传感器网络路由的蚁群优化算法,并对算法的收敛性进行证明,最后对找到最优解后信息素的变化进行了分析.

这些算法很少将传感器节点的能量和通信链路的能量消耗同时考虑,而传感器节点的剩余能量和链路的通信消耗都会影响到传感器网络的生命周期.本文将这二者有机地结合起来融合到蚁群优化的信息素更新、启发函数和状态转移函数中,提出一种传感器网络中基于蚁群优化的能量均衡的数据查询协议 EBDQ(energy balance data query protocol based ant colony optimization).

本文第 1 节给出 EBDQ 算法相关的定义.第 2 节讨论 EBDQ 算法中的状态转移函数与信息素更新.第 3 节给出 EBDQ 算法并对其性能进行分析.第 4 节是算法仿真与结果分析.第 5 节是结论.

1 EBDQ 相关定义

定义 1. 无线传感器网络 $G=(V,E)$ 为无向图,其中: V 为顶点集, $V=\{v_1,v_2,\dots,v_n\}$,表示网络中的节点; E 为边的集合, $E=\bigcup e(v_i,v_j)$,表示网络的链路.设节点的最大通信距离为 R ,节点 v_i,v_j 之间的欧氏距离为 $d(v_i,v_j)$,连接两节点的边为 $e(v_i,v_j)$,设节点间的通信是对称的,则

$$d(v_i,v_j) \leq R \Leftrightarrow e(v_i,v_j) \in E, e(v_i,v_j) = e(v_j,v_i) \quad (1)$$

定义 2(欧氏距离). 节点 v_i 的坐标为 $v_i(x_{v_i},y_{v_i})$,节点 v_j 的坐标为 $v_j(x_{v_j},y_{v_j})$,两节点间的欧氏距离见公式(2):

$$d(v_i,v_j) = \sqrt{(x_{v_i} - x_{v_j})^2 + (y_{v_i} - y_{v_j})^2} \quad (2)$$

定义 3(路径集合). $PathSet = \bigcup p_i$, p_i 是从源节点到目的节点的一条可达路径.

定义 4(最优路径). 若 $p \in PathSet, Cost(p) = \min(Cost(PathSet))$,则 p 是一条最优路径, $Cost(p)$ 表示路径 p 上的能量消耗.

定义 5(蚂蚁). 这是指各源节点向目的节点发送的试探数据包,每个蚂蚁数据包中包含禁忌表、边列表、源节点的坐标、目的节点的坐标.其中,禁忌表用于记录该蚂蚁走过的节点,初始状态时蚂蚁的禁忌表为空,边列表记录蚂蚁每次试探所选择的边.

定义 6(路由趋势向导). 当前节点 v_j 可以到达目的节点的能见度,反映了源节点、中间节点、目的节点之间的位置关系,用 $Guide(v_j)$ 表示.

若用 v_s 表示源节点, v_d 表示目的节点,蚂蚁当前所在节点为 v_i , v_j 为节点 v_i 的邻居节点,则 $Guide(v_j)$ 的值如公式(3)所示:

$$Guide(v_j) = \begin{cases} 1, & \text{如果 } d(v_i,v_s) \leq d(v_j,v_s), d(v_i,v_d) \geq d(v_j,v_d) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

路由趋势向导 $Guide(v_j)$ 为 1 的节点更有可能成为最优路由上的节点,而对 $Guide(v_j)$ 为 0 的节点访问则更多

地会成为无效探索,如图 1 中节点 A 比节点 B 更有可能成为最优路径上的节点.

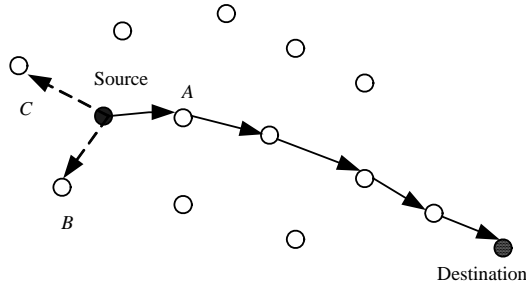


Fig.1 Nodes location and routing trend
图 1 节点位置与路由趋势

2 EBDQ 状态转移与信息素更新

蚂蚁 $k(k=1,2,\dots,m, \text{且 } m < n)$ 在运动过程中,根据邻居节点的路由趋势向导和各条路径上的信息素决定其转移方向,用禁忌表 $tabu_k(k=1,2,\dots,m)$ 来记录蚂蚁 k 当前所走过的节点,则蚂蚁 k 在 t 时刻由节点 v_i 选择节点 v_j 作下一跳邻居节点的状态转移概率 $p_{v_i v_j}^k(t)$ 如公式(4)所示:

$$p_{v_i v_j}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{v_i v_j}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{v_i v_j}(t)]^\beta \cdot Guide(v_j)}{\sum_{v_j \notin tabu_k} [\tau_{v_i v_j}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{v_i v_j}(t)]^\beta}, & \text{if } v_j \notin tabu_k \\ 0, & \text{if } v_j \in tabu_k \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\tau_{v_i v_j}(t)$ 表示 t 时刻路径 (v_i, v_j) 上的信息素,网络初始时,各路径上的信息素相等,即 $\tau_{v_i v_j}(0) = const.$ $\eta_{v_i v_j}(t)$ 为启发函数,将链路 $e(v_i, v_j)$ 上的能量消耗和当前节点的剩余能量作为蚂蚁选择下一跳的启发函数,如公式(5)和公式(6)所示:

$$\eta_{v_i v_j}(t) = \frac{E_{v_j-residual}}{Cost(v_i, v_j)} \quad (5)$$

$$Cost(v_i, v_j) = Cost(v_i) + Metric(v_i, v_j) = E_{elec} \cdot k + (E_{elec} \cdot k + E_{amp} \cdot k \cdot (d(v_i, v_j))^2) \quad (6)$$

其中, $E_{elec} = 50nJ/bit, E_{amp} = 100pJ/bit / m^2$.

两个参数 α, β 分别是信息启发式因子和期望启发式因子.信息启发式因子反映出蚂蚁运动过程中积累的信息在蚂蚁选择下一跳所起的作用,其值越大,则该蚂蚁倾向于选择其他蚂蚁经过的路径,蚂蚁之间协作性越强.期望启发式因子反映了节点剩余能量和链路能量消耗对蚂蚁选择下一跳的影响. $Cost(v_i, v_j)$ 表示蚂蚁在节点 v_i 选择节点 v_j 作下一跳的代价, $Cost(v_i)$ 表示节点 v_i 的能量消耗, $Metric(v_i, v_j)$ 表示节点 v_i 和节点 v_j 直接通信花费的代价, $E_{v_j-residual}$ 表示节点 v_j 当前的剩余能量.从公式(5)、公式(6)可以看出,链路能量消耗越小、剩余能量越大的邻居节点被选为下一跳的概率越大.

在蚂蚁遇到目的节点后,通过公式(7)~公式(10)对路径上的信息素进行调整,即 $t+n$ 时刻在路径 (v_i, v_j) 上的信息素可以表示为

$$\tau_{v_i v_j}(t+n) = \begin{cases} (1-\rho) \cdot \tau_{v_i v_j}(t) + \Delta \tau_{v_i v_j}(t), & \text{如果 } e(v_i, v_j) \in p \text{ 或 } v_i, v_j \in tabu_k \\ \tau_{v_i v_j}(t), & \text{如果 } v_i, v_j \notin tabu_k \end{cases} \quad (7)$$

$$\Delta \tau_{v_i v_j}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{v_i v_j}^k(t) \quad (8)$$

$$\Delta\tau_{v_i,v_j}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} \cdot (E_{threshold} - Cost(p)) \left(1 - \frac{Cost(v_j)}{Cost(p)}\right), & \text{若 } e(v_i, v_j) \in p \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (9)$$

$$Cost(p) = \sum_{i=1}^{|tabu_k|} Cost(v_i) + \sum_{i=1, j=1}^{|tabu_k|} Cost(v_i, v_j), \quad e(v_i, v_j) \in p, \quad v_i, v_j \in tabu_k \quad (10)$$

公式(7)中, ρ 表示信息素挥发系数, $1-\rho$ 表示信息素残留因子. 为了防止信息的无限累积, 让 $0 \leq \rho \leq 1$; $\Delta\tau_{v_i,v_j}^k(t)$ 表示本次循环中路径 (v_i, v_j) 上的信息素增量, 初始时刻 $\Delta\tau_{v_i,v_j}^k(0) = 0$, $\Delta\tau_{v_i,v_j}^k(t)$ 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中留在路径 (v_i, v_j) 上的信息量. 公式(9)中, Q 表示信息素强度, L_k 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中所走路径的总长度.

$E_{threshold}$ 是一个能量阈值, 用 $E_{threshold} - Cost(p)$ 的正负来决定对路径 p 是奖励还是惩罚. 当路径 p 上的能量消耗较小时, 则对路径进行奖励; 否则, 当路径 p 上的能量消耗超过能量阈值时, 则对路径进行惩罚, 从而改善蚁群算法里单一的正反馈机制. 这样, 传感器网络中的数据查询就不会在单一的某条路径上进行, 从而使传感器网络中的能量消耗均衡地分布于多数节点.

从公式(7)中可以看出, 对蚂蚁未走过的路径, 信息素不挥发, 这样可以减少最优解路径与其他路径信息素的差别, 扩大搜索范围. 当在最优路径上的能量消耗达到一定程度时, 为蚂蚁寻找新的路径做好准备; 从公式(9)中可以看出, 能量消耗小的节点, 其边上的信息素增量更多些. 若节点的能量消耗与整条路径上的能量消耗比越大, 则边上的信息素增量会慢慢减少, 从而让蚂蚁去寻找新的路径.

总之, 通过公式(7)、公式(9)对信息素进行更新, 在考虑链路和节点上能量消耗的同时, 也考虑了节点当前的剩余能量. 在利用蚂蚁的正反馈机制尽快找到最优路径的同时, 也利用了负反馈原理对能量消耗过大的最优路径进行惩罚, 从而使网络中的数据查询分散于多条路径, 达到能量均衡的目的.

3 EBDQ 算法及性能分析

3.1 蚂蚁移动步骤

假设传感器节点可以通过全球定位系统(GPS)等设备或者其他手段获得自己的地理坐标信息, 并明确目的节点的坐标信息, 每个节点都维护一张其邻居节点信息表, 表中包括邻居节点的坐标位置、当前剩余能量. 表中的信息可以通过周期性地与邻居节点交换少量数据来维持更新. 蚂蚁从源节点出发向目标节点移动, 直到遇到目标节点则完成一次循环.

设传感器网络中有 m 个源节点, 网络初始时, 每条边的信息素为一常数. 将 m 只蚂蚁分别放在 m 个源节点上, 第 k 只蚂蚁放在第 k 个源节点上, 第 k 个源节点为节点 v_i , 第 k 个源节点的邻居节点集为 $NeighborSet(v_i)$, 蚂蚁 k 将 v_i 加入到自己的禁忌表 $tabu_k$ 中, 即此时 $tabu_k = \{v_i\}$, 然后按下面的步骤进行移动:

步骤 1. 根据 $NeighborSet(v_i)$ 中节点的路由趋势向导, 选择 $Guide(v_j)$ 为 1 的节点作为自己的下一跳节点集 $NextHopSet(v_i)$;

步骤 2. 对于 $\forall v_j \in NextHopSet(v_i)$, 若 $v_j \notin tabu_k$, 则根据公式(4)计算其状态转移概率, 并将节点 v_j 加入 $tabu_k$ 中, 边 $e(v_i, v_j)$ 加入到边列表中; 若对于任意的节点 v_j , 都有 $\forall v_j \in NextHopSet(v_i) \rightarrow v_j \in tabu_k$, 表示当前节点的所有下一跳节点均在禁忌表中, 则蚂蚁回退一步;

步骤 3. 若 $NextHopSet(v_i) = \{desitiation_node\}$, 表示蚂蚁 k 已到达目的节点, 则停止探索, 边列表中的边集合形成路径 p , 利用公式(7)更新信息素; 否则转步骤 2.

3.2 蚂蚁移动算法伪码

```
NC=0; NC_max=30;    //NC 为循环次数, NC_max 为最大迭代次数
 $\tau_{v_i,v_j}(0) = l$ ;
p={}
```

//p 为路径

```

tabuk={ }
While (NC<NCmax)
{
    tabuk={vi};
    NextHopSet(vi)=Neighbor.Set(vi)-{vj|vj∈NextHopSet(vi) && Guide(vj)=0};
    While (NextHopSet(vi)≠{destination_node})
    {
        If (vj∉tabuk)
            Select vj by 公式(4);
            tabuk= tabuk∪{vj};
            p=p∪e(vi,vj);
        }
    Print p;
    Update τvivj(t+n) by 公式(7);
    NC=NC+1;
}
    
```

第 k 只蚂蚁经过 NC 次迭代后,形成第 k 个源节点 v_i 到目的节点的最优路径,其他 $m-1$ 只蚂蚁也按上述步骤并行移动,分别形成各自源节点到目的节点的最佳路径.至此,形成了从目标节点到源节点的查询路径,查询消息从目标节点发出,沿各最佳路径到达源节点,查询结果则从源节点沿最佳路径到达目标节点.在数据查询过程中,在路径的交叉点处进行数据汇聚.

3.3 EBDQ算法分析

定理 1. EBDQ 算法不会形成回路.

证明:如图 2 所示,假设节点 A 的下一跳是节点 B ,节点 B 的下一跳是节点 C ,而节点 C 的下一跳是节点 A ,则构成了回路.现在证明这样的回路不可能出现.

若节点 A 的下一跳是节点 B ,则 $Guide(B)=1 \Leftrightarrow d(s,A) \leq d(s,B), d(A,d) \geq d(B,d)$;

若节点 B 的下一跳是节点 C ,则 $Guide(C)=1 \Leftrightarrow d(s,B) \leq d(s,C), d(B,d) \geq d(C,d)$;

若节点 C 的下一跳是节点 A ,则 $Guide(A)=1 \Leftrightarrow d(s,C) \leq d(s,A), d(C,d) \geq d(A,d)$,

则有 $d(A,d) \geq d(B,d) \geq d(C,d) \geq d(A,d)$,这里,只有在是等号的情况下才会成立.但等号不可能同时出现,这是因为,若 $d(A,d)=d(B,d)$,则节点 A, B 必须关于源节点与目的节点的连线对称;同理,若 $d(B,d)=d(C,d)$,那么节点 B, C 也必须关于源节点与目的节点的连线对称,则节点 B 关于一条直线出现了两个不同的对称点,这是不可能的.所以必有 $d(A,d) > d(A,d)$,矛盾.所以假设不成立,则 EBDQ 算法不会形成回路.证毕. \square

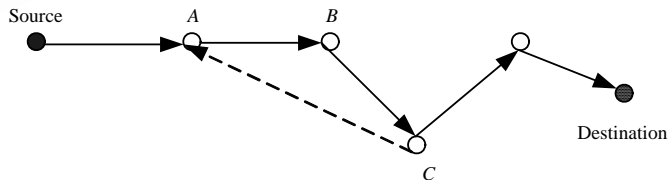


Fig.2 There is no loop in the EBDQ

图 2 EBDQ 算法中没有回路

定理 2. EBDQ 算法得到的数据查询路由是一棵能量最优汇聚树.

证明:蒙特-卡洛(Monte-Carlo)模拟表明,在一个有界矩形区域内,两条直线相交的可能性为 69%;多条直线

相交的可能性更大,比如 5 条直线相交的概率可以达到 99.7%.

因此,由 EBDQ 算法得到的从各源节点到目标节点的最优路径在途中相交的可能性也很大.就算在途中不相交,在目的节点处也一定会相交,这样就得到了一棵以目的节点为根节点的汇聚树,如图 3 所示.

因为此树的每条树枝上的能量消耗均为最小的,所以整棵树也是能量消耗最小的.当查询结果由源节点处沿最佳路径向目的节点传输时,在路径相交处进行数据汇聚可以减少网络中的数据传输量、降低网络的能量消耗.证毕. □

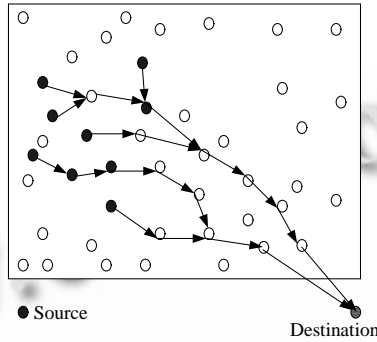


Fig.3 Optimal aggregation tree formed by the optimal paths
图 3 最佳路径形成的最优汇聚树

4 算法仿真与结果分析

为了验证 EBDQ 数据查询协议的有效性,将 EBDQ 与文献[16]中提及的 3 种 DC 路由(data-centric routing):近源汇聚 CNS(center at nearest source)、最短路径树 SPT(shortest paths tree)、贪心增长树 GIT(greedy incremental tree)协议进行比较.

EBDQ 协议中的主要参数: $\alpha=1, \beta=5, \rho=0.5, Q=100, NC=30$.100 个节点随机地分布在 100×100 的区域内,所有节点均静止不动,为每个节点随机生成 50 个单位以内的能量.类似文献[16],分两种情形进行模拟.

情形 1. 事件半径模型,随机抽取一个节点作为目的节点,在 100×100 的区域内随机选取一个坐标作为事件中心,100 个节点中,除目的节点以外,将在事件中心感知半径范围内的节点作为源节点.

情形 2. 随机选取模型,在 100 个节点中随机选取 k 个节点作为源节点,选取一个节点作为目的节点.

图 4 为情形 1 下,感知半径一定、传感器网络在不同协议下,随通信半径的变化所需的能量消耗;图 5 为情形 1 下,通信半径一定、传感器网络在不同协议下,随感知半径的变化所需的能量消耗.

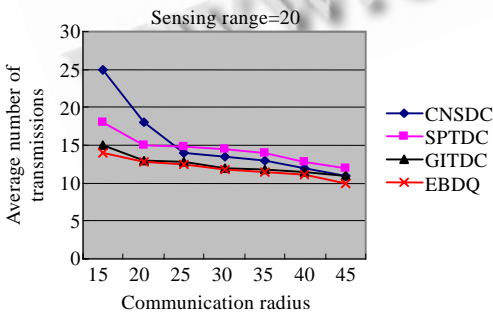


Fig.4 Relation of energy costs versus communication radius in event-radius model

图 4 事件半径模型中能量消耗与通信半径的关系

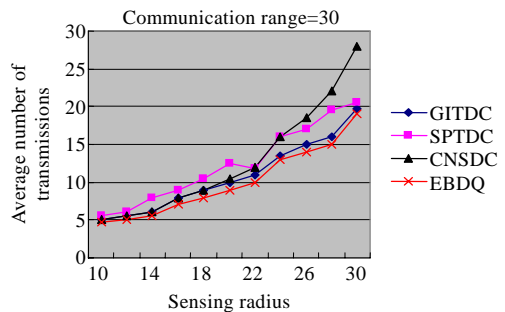


Fig.5 Relation of energy costs versus sensing range in event-radius model

图 5 事件半径模型中能量消耗与感知半径的关系

从图 4、图 5 中可以看出,在事件半径模型的情况下已有的 3 种协议中,GITDC 协议的效果比较好;而 EBDQ 协议紧逼 GITDC 协议,有时甚至比 GITDC 还要好.EBDQ 在通信半径一定、感知半径为 10 时,与其他 3 个协议的能量消耗差不多;当感知半径为 40 时,EBDQ 比 CNSDC 节能约 32%,比 GITDC 节能约 4%.

图 6 为情形 2 下,在随机地从 100 个节点中选取 10 个节点,用 9 个节点作为源节点、1 个节点作为目的节点时,在不同的协议下,网络的能量消耗随通信半径的变化而变化的情形.图 7 为在情形 2 下通信半径一定以及不同协议的条件下,网络的能量消耗随源节点的变化而变化的情形.

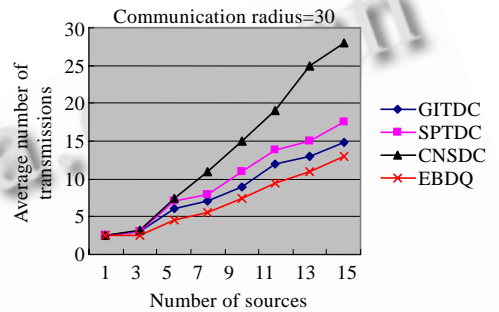
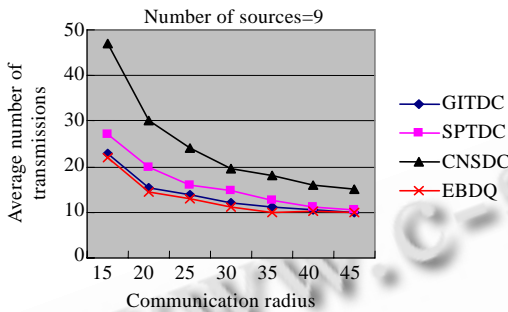


Fig.6 Relation of energy costs versus communication radius in random-sources model

Fig.7 Relation of energy costs versus number of sources in random-sources model

图 6 随机选取模型中能量消耗与通信半径的关系

图 7 随机选取模型中能量消耗与源节点数量关系

从图 6、图 7 可以看出,已有的 3 种协议在随机选取模型中,CNSDC 协议的节能效果最差,GITDC 协议效果最好.EBDQ 协议略优于 GITDC 协议,并且随着源节点的增加,EBDQ 协议的优势更加明显.这是因为 EBDQ 协议是分布式的协议,每只蚂蚁只需知道自己邻居节点的信息,而已有的其他 3 种协议都是集中式的.另外,EBDQ 协议考虑了网络中能量消耗的均衡问题,当前最优路径的能量消耗达到一定的能量阈值,蚂蚁会去寻找新的最优路径,从而将网络中的能量消耗分摊在不同的节点上,这样可以提高整个网络的能量有效性,延长了传感器网络的生命周期.

为了分析 EBDQ 协议在搜索最优路径的时间效率,将 EBDQ 协议与上面提到的 3 种协议中节能效果最好的 GITDC 协议从寻径时间复杂度方面进行了比较.图 8 是事件半径模型中不同协议的时间效率与通信半径的关系,图 9 是随机选取模型中不同协议时间效率与通信半径的关系.由图 8 和图 9 可知,EBDQ 协议的时间效率比 GITDC 要高,时延比 GITDC 要小,并随通信半径的增加而有所收敛.这是因为 GITDC 协议是集中式的,而 EBDQ 协议是分布式的,因而具有更好的可扩展性.

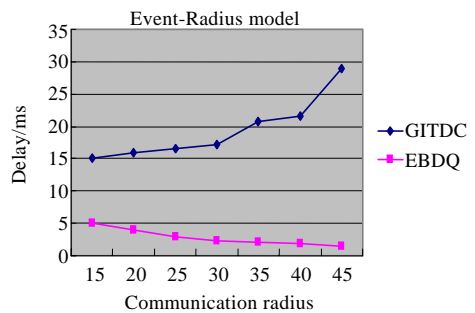
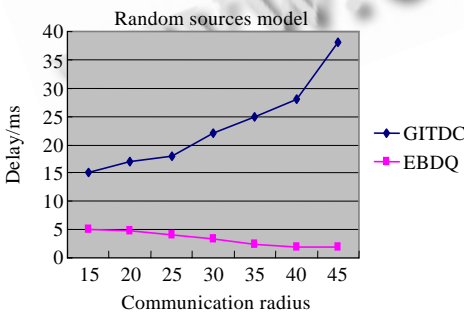


Fig.8 Relation of time efficiency versus communication radius in event-radius model

Fig.9 Relation of time efficiency versus communication radius in random sources model

图 8 事件半径模型中时间效率与通信半径的关系

图 9 随机选取模型中时间效率与通信半径的关系

5 结束语

本文将蚁群优化算法与传感器网络中数据查询协议相结合,提出了一种基于蚁群优化的能量均衡数据查询协议 EBDQ.该协议利用路由趋势向导和奖励机制引导蚂蚁快速地找到一条从源节点到目的节点的最优路径,通过多次迭代,各源节点到目的节点的最优路径则构成了从目的节点到各源节点的数据查询路由.查询消息从目的节点沿路经向源节点传输,查询结果则从源节点向目的节点传输,并在路径相交处进行数据汇聚.当查询路由上的能量消耗达到一定的阈值时,通过惩罚机制来减少该条路径上的信息素,从而促使蚂蚁去寻找新的查询路由,这样可以将网络中的能量消耗均衡在不同的节点上.实验结果表明,EBDQ 因其具有分布性和能量均衡的特性,与已有的 3 种 DC 协议相比,降低了算法的时间复杂度,节省了更多的网络能量,是能量高效的数据查询协议.

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的同行,尤其是武汉大学计算机学院的曹加恒教授和彭智勇教授表示感谢.

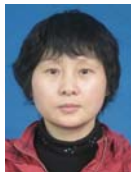
References:

- [1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 2002,38(4): 393–422. [doi: 10.1016/S1389-1286(01)00302-4]
- [2] Estrin D, Govindan R, Heidemann J, Kumar S. Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks. In: Kodesh H, ed. *Proc. of the ACM/IEEE MobiCom'99*. New York: ACM Press, 1999. 263–270.
- [3] Li JZ, Li JB, Shi SF. Concept, issues and advance of sensor networks and data management of sensor networks. *Journal of Software*, 2003,14(10):1717–1727 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1717.htm>
- [4] Dorigo M, Caro GD. *The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic: New Ideas in Optimization*. London: McGraw-Hill, 1999.
- [5] Bonabeau E, Dorigo M, Theraulaz G. Inspiration for optimization from social insect behavior. *Nature*, 2000,406(6):39–42. [doi: 10.1038/35017500]
- [6] Dorigo M, Maniezzo V, Colnani IA. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Part B*, 1996,26(1):29–41. [doi: 10.1109/3477.484436]
- [7] Dorigo M, Gambardella LM. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, 1997,1(1):53–66. [doi: 10.1109/4235.585892]
- [8] Dorigo M, Gambardella LM, Middendorf M. Guest editorial: Special section on ant colony optimization. *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, 2002,6(4):317–319. [doi: 10.1109/TEVC.2002.802446]
- [9] Ding NN, Liu PXP. Data gathering communication in wireless sensor networks using ant colony optimization. In: *Proc. of the 2004 IEEE Int'l Conf. on Robotics and Biomimetics*. Shenyang, 2004. 822–827. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1545067>
- [10] Lindsey S, Raghavendra CS. PEGASIS: Power-Efficient gathering in sensor information systems. In: *Proc. of the IEEE Aerospace Conf. Montana: IEEE Aerospace and Electronic Systems Society*, 2002. 1125–1130. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1035242>
- [11] Stutzle T, Hoos H. The MAX-MIN ant system and local search for the traveling salesman problem. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Evolutionary Computation*. New York: IEEE, 1997. 308–313. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=592327>
- [12] Misra R, Mandal C. Ant-Aggregation: Ant colony algorithm for optimal data aggregation in wireless sensor networks. In: *Proc. of the Wireless and Optical Communications Networks, 2006 IFIP Int'l Conf. Piscataway: IEEE*, 2006. 5–8. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1666600>
- [13] Vijaykumar V, Chandrasekar R, Srinivasan T. An ant odor analysis approach to the ant colony optimization algorithm for data-aggregation in wireless sensor networks. In: *Proc. of the Wireless Communication, Networking and Mobile Computing*. Piscataway: IEEE, 2006. 1–4. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4149435>

- [14] Huang R, Zhu J, Xu GH. Energy-Efficient mechanism based on ACO for the coverage problem in sensor networks. Journal of Southeast University (English Edition), 2007,23(2):255–260.
- [15] Yang WG, Guo TD. Ant colony optimization algorithm and its convergence for wireless sensor network routing problem. Journal of Systems Science and Mathematical Science, 2007,27(2):239–246 (in Chinese).
- [16] Krishnamachari B, Estrin D, Wicker S. Modelling data-centric routing in wireless sensor networks. In: Proc. of the IEEE Infocom. 2002. 1–11. <https://eprints.kfupm.edu.sa/51540/1/51540.pdf>

附中文参考文献:

- [3] 李建中,李金宝,石胜飞.传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展.软件学报,2003,14(10):1717–1727. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1717.htm>
- [15] 杨文国,郭田德.求解无线传感器网络路由问题的蚁群最优化算法及其收敛性.系统科学与数学,2007,27(2):239–246.



崔艳荣(1968—),女,湖北仙桃人,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为无线传感器网络,高级数据库.



李克清(1966—),男,博士,副教授,主要研究领域为无线传感器网络,网络服务质量,优化算法设计.