

Q-Learning-Based Routing Mechanism for Multi-Sink Wireless Sensor Networks*

ZHOU Shuli¹, ZHANG Yun¹, CHEN Zhi^{1,2,3,4*}, HU Luoquan⁵, YUE Wenjing⁴

1. College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;
2. State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China;
3. Jiangsu High Technology Research Key Laboratory for Wireless Sensor Networks, Nanjing 210003, China;
4. Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology, Ministry of Education, Nanjing 210003, China;
5. Suzhou Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Suzhou Jiangsu 215104, China

Abstract: The traditional single-Sink sensor networks have some disadvantages, such as consuming energy of the nodes on the key path too quick, the singleness of routing algorithm, the invalidation of the Sink node, etc. While multi-Sink WSNs can solve these problems efficiently, protocols of multi-Sink WSNs are studied and a new routing mechanism based on Q-learning is presented. By using Q-learning, nodes take various kinds of conditions into account, study periodically and achieve their optimal routing. Finally the source node chooses the optimal path to send signals according to the Q value. Case study shows that this mechanism saves the node energy, prolongs the life of sensor networks.

Key words: Q-learning; wireless sensor networks; multi-Sink node; routing mechanism

EEACC: 6150P

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.10.022

基于 Q 学习的多 Sink 节点无线传感网路由机制研究*

周淑俐¹, 章 韵¹, 陈 志^{1,2,3,4*}, 扈罗全⁵, 岳文静⁴

1. 南京邮电大学计算机学院, 南京 210003;
2. 南京大学计算机软件新技术国家重点实验室, 南京 210093;
3. 江苏省无线传感网高技术研究重点实验室, 南京 210003;
4. 宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室, 南京 210003;
5. 苏州出入境检验检疫局, 江苏 苏州 215104

摘 要: 单 Sink 节点无线传感网存在部分关键区域节点能量消耗过快、路由选择算法单一及 Sink 节点失效的问题。多 Sink 节点无线传感网能有效解决上述问题, 研究多 Sink 节点传感网的路由协议及其存在的不足, 提出了一种基于 Q 学习的路由选择机制。利用该学习方法节点综合考虑各种环境因素, 进行周期性的学习训练, 优化路径选择, 最后按照计算得到的 Q 评估值选择最优的路径进行数据传送。实例分析表明, 基于 Q 学习的路由机制能有效延长网络的使用寿命。

关键词: Q 学习; 无线传感网; 多 Sink 节点; 路由机制

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)10-1479-05

无线传感网节点一般能量供应、计算和通信能力有限, 在部署节点和设计各种协议时要考虑有效利用各种资源^[1]。在无线传感网中, 传感器节点采集环境变量并将它们传送给 Sink 节点(网关节点或汇聚节点), Sink 节点通过无线方式接收各传感器节点的数据并以有线或无线的方式将数据传送给最终用户。无线传感网在许多领域都得到了很好的应用, 但在传

统的单 Sink 传感网中存在许多问题, 比如靠近 Sink 节点或者关键路径上的节点能量消耗过快, 会引起节点的能量消耗不均衡; 单 Sink 节点的失效会引起整个无线传感网的通信中断, 当传感网的规模不断增加, 节点数目不断扩充, 靠近 Sink 节点的传感节点比其他节点消耗的能量更快, 因为他们需要传递大量的消息, 因此延长整个传感网的寿命成了一个至关重要

项目来源: 国家自然科学基金项目(60905040); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目(BK2011756); 江苏高校优势学科建设工程项目(yx002001); 江苏省博士后科研资助计划项目(1101006B); 江苏省高校自然科学基金研究计划(08KJB520007, 11KJB510018); 南京邮电大学科研基金项目(NY207020, NY210011, NY211009)

收稿日期: 2011-04-22 **修改日期:** 2011-07-21

的问题。针对单 Sink 传感网路由中存在的缺点,本文研究了多 Sink 传感网的路由协议。多 Sink 节点传感网特别适应于大规模的传感网,多 Sink 节点会减少传感节点到 Sink 节点的平均距离,减少相应的跳数,能更加均衡地消耗能量。本文在研究了多 Sink 传感网路由协议的基础上提出了一种具有一定的智能学习和适应能力的路由机制,应用增强学习^[2-6]来达到寻求在多 Sink 传感网中节点使用寿命最长、能量消耗均衡的最优路径的目的。

本文介绍 Q 学习算法的路由选择机制,通过分析说明 Q 学习路由机制对于延长节点寿命的作用。Q 算法工作时只需利用各个节点的能量状态信息,不增加网络通信量,均衡了节点的能量消耗,延长了网络的使用寿命。

1 相关工作

多 Sink 无线传感网路由协议的研究目前还处于起步阶段,相比单 Sink 路由协议具有更大的优势:能够避免单 Sink 节点失效时造成的整个传感网的通信中断、减轻 Sink 节点附近能量消耗不均衡的压力、可在不同 Sink 节点间采用不同的路由算法通过不同路径传送数据、能够根据不同用户的需求控制好网络中的数据流(图像、声音、视频数据流)等。多 Sink 节点传感网中,路由可以有不同的选择,数据能够沿不同路径传输。Pietro Ciciiriello^[7]提出周期性的消耗适应路由协议 PAMR,设想每个数据源节点到相应的 Sink 节点具有相互独立的树状结构,从而建立源节点到相应 Sink 节点的路径,该协议借鉴了多商品流网络设计问题来解决传感器网络设计高效性、分散性问题,但是该协议适合于数据量较少的应用场合,而且算法过于复杂,主要解决了多源到多 Sink 的传感网的分散性问题,当网络规模较大,而且数据量比较多的情况不太适用;Meng Min 提出 PBR 路由协议^[8],基于能量级别传送数据,能量级别定义为节点在当前所剩能量,能够向邻节点传输数据的次数,路径能量级别定义为一个节点到目标 Sink 节点整个路径的最小能耗。该协议解决了能量均衡消耗的问题,延长了网络的寿命,但是它适合于网络拓扑比较简单且 Sink 节点固定的情况;Chen Yue-quan 提出了 MRMS^[9]多 Sink 节点路由协议,针对传输路径选择、高能效的动态分簇维持以及路径切换问题,提出了一种新的基于邻节点间距离到相应 Sink 的跳数以及节点剩余能量信息的路径开销度量算法,该协议主要应用于大规模分簇传感网中,在传感网的规模不大且不分层的情况算法有点复杂,不太实用。由此可见以前的很多多

Sink 节点传感网路由协议都是从某一个角度来研究多 Sink 路由涉及的问题,考虑得更多的是节点的剩余能量,没有很好地解决 Sink 节点间协调问题,以及能量的均衡消耗,或者是算法过于复杂造成能量开销较大。它们考虑因素不全面或者计算复杂度过高,没有考虑节点失效或者移动时的路径选择,而 Q 学习方法适合于任何规模的传感器网络,算法不太复杂,考虑的因素较全,如节点的剩余能量、跳数、距离等,有效的均衡了节点的能量消耗,延长了网络的使用寿命。

2 Q 学习算法

增强学习方法(RL 算法)^[10]要解决的是这样的问题:一个能感知环境的自治 Agent,怎样通过学习选择能达到其目标的最优动作。Q 学习属于增强学习方法中的一种比较成熟的非监督学习方法。无线传感网中的节点即可映射为一个 Agent。可用马尔科夫决策过程(MDP)定义 RL 学习问题的一般形式。传感网中的节点依据路由协议寻求最优路径与邻节点进行数据传送的过程就是一个马尔科夫过程的扩展^[11]; s 是 Agent 有限状态集, $s \in S$; A 是第 i 个 Agent 可用的动作集($0 \leq i \leq N$, N 为最大 Agent 数), $a^{(i)} \in A^{(i)}$, $u = (a^{(1)}, a^{(2)}, \dots, a^{(N)})$ 为多 Agent 联合动作; $T(S, a^{(1)}, a^{(2)}, \dots, a^{(N)})$ 是多 Agent 状态-动作空间到状态空间概率分布的映射函数; $r^{(i)}(s, a^{(i)}, s')$ 是第 i 个 Agent 局部回报函数; $R_{i,s'}^a = E(r_i^{(i)} | s_i = s, a_i^{(i)} = a, s_{i+1} = s')$, $Q^{(i)} = (s, a)$ 是第 i 个 Agent 局部 Q 评估函数, $Q_i^{(i)}(s, a) = E^\pi \{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{i+k} | s_i^{(i)} = s, a_i^{(i)} = a \}$, $\pi^{(i)}(s)$ 是第 i 个 Agent 局部策略; $v^{(i)}(s) = Q^{(i)}(s, \pi^{(i)}(s))$ 是第 i 个 Agent 状态值函数。

在无线传感网中,节点在寻求最优路径时,每个 Agent 都要有初始的 Q 值。通过信息交互基于增强学习机制寻找下一个 Agent,在 Q 值更新过程中是基于以下方法的:

$$Q_{i+1}^{(i)}(s_i^{(i)}, a_i^{(i)}) = (1-\alpha)Q_i^{(i)}(s_i^{(i)}, a_i^{(i)}) + \alpha(r_i^{(i)}(s_i^{(i)}, a_i^{(i)}, s_{i+1}^{(i)}) + \gamma \max_{a^{(j)} \in A^{(j)}, j \in \text{Neighbor}(i)} Q_i^{(j)}(s_{i+1}^{(j)}, a^{(j)})) \quad (1)$$

这里, γ 为延迟回报与立即回报的相对比例因子($0 \leq \gamma \leq 1$), α ($0 \leq \alpha \leq 1$) 为学习因子。不同无线传感网络可能具有不同的资源,调控 α 将使 Q 评估值更新方法收敛。当 $\alpha=1$ 时,为确定性回报情形下的规则。此时上式变为:

$$Q_{i+1}^{(i)}(s_i^{(i)}, a_i^{(i)}) = r_i^{(i)}(s_i^{(i)}, a_i^{(i)}, s_{i+1}^{(i)}) + \gamma \max_{a^{(j)} \in A^{(j)}, j \in \text{Neighbor}(i)} Q_i^{(j)}(s_{i+1}^{(j)}, a^{(j)}) \quad (2)$$

第 i 个 Agent 在时间 t 采取的动作是确定将数据发送给哪个邻居 Agent, 所得的回报就来自该邻居 Agent, 一般不同的 Agent 具有不同的回报值, Agent 在发送信息时是选择具有最大回报值的邻居 Agent 发送。从数据源节点到 Sink 节点能通过不断的迭代产生具有最大 Q 评估值的路径, 该路径即是最优路径。

3 基于 Q 学习的多 Sink 网路由机制

多 Sink 无线传感网路由考虑的是如何把采集到的数据根据能量有效的原则传送到最佳的 Sink 节点。多 Sink 路由协议研究还处于起步阶段, 目前研究的路由协议大多存在考虑因素不全面, 如未考虑关键路径上节点能量消耗过快, 路由算法过于复杂、节点移动或失效等, 基于 Q 学习的路由机制能比较有效地解决能量消耗不均衡的问题。下面利用 Q 学习方法机制来实现能量感知路由协议, 从而实现路由选择^[12-13]。

假定学习因子 $\gamma=1$, 为了方便讨论只考虑确定性的情况, 即 $\alpha=1$ 的情形。Agent 综合考虑路径上节点的剩余能量和节点间能量消耗、跳数, 每次选择较优的 Agent 来传送数据, 并在每次的选择后根据获得的回报值选择下一个较优的 Agent。这样从源节点到每个 Sink 节点都能通过不断的迭代找到一条最佳的路径, 然后通过比较不同 Sink 节点的 Q 值, Q 值高的 Sink 节点即为应选择的 Sink 节点。学习过程如下:

(1) 汇聚节点 Sink k (在这里 $1 \leq k \leq 3$) 以一定的周期向邻居 Agent 广播学习评估消息, 启动路径建立过程。学习评估消息中包含 Agent 的回报值、 Q 评估值及能量信息, 回报值的初始值设为 0。

(2) Agent i 收到邻居 Agent j 发送的学习消息时, 相对发送该消息的 Agent j , 只有当自己距离源节点更近而距 Sink k 更远的情况下, 才需进行学习训练, 否则放弃学习。其中相关定义如下:

① 定义一个 D 集合来存放本周期内已学习过的 Agent 以免出现路由环路现象;

② 在 WSN 无线通信模型中, 能量的消耗主要是进行数据传输。发送 l bit 数据包到距离为 d 的接收方的能量消耗为 $E_{i,j}$ 。

在 WSNs 中, 跳数对于节点的能量消耗也是有很大的影响的。跳数关于节点能量消耗的公式: $E_h = e^{\text{hop}(i)/H}$, 其中 $\text{hop}(i)$ 表示下一跳 Agent j 到 Sink k 的跳数, Agent i 到 Sink k 的总跳数为 H 。

综合起来, Agent i 发送给 Agent j l bit 数据包的能量消耗为: $E_{i,j}(l, d) = E_{i,j} e^{\text{hop}(i)/H}$

$$\text{回报函数 } r(s_i, a_i) = \frac{R}{E_{i,j}(l, d)} = \frac{R}{E_{i,j} e^{\text{hop}(i)/H}}。$$

在本文中, $E_{i,j}$ 假定已知, 故只要考虑跳数对节点能量消耗的影响即可, 即只计算 $E_h = e^{\text{hop}(i)/H}$ 即可。

③ Sink k 周期性地不断向邻居节点发送学习消息, 各个邻节点不断地向下一个节点发送学习消息, 这样从各个 Sink 节点到源节点的 Q 评估值就逐步的迭代出来。源节点通过比较到不同路径上的 Q 值, 选择 Q 值最大的作为通信的下一个节点把数据发送出去, 从而最终把源节点的数据传送到 Sink 节点, 最后通过 Sink 节点把数据发送到计算机处理系统。该 Q 学习机制中, 节点间通信的每一步选择都综合考虑了节点的通信能力、跳数、剩余能量, 能从中选择最能均衡能量、节省能量、延长节点寿命的路径选择路由, 因而具有一定的实用价值和现实意义。

4 实例分析

假设网络拓扑如图 1 所示, 用有向图 $G(V, E)$ 来表示, V 代表传感网中的各个 Agent 节点, $V = (\text{源节点}, V1, V2, \dots, V9, \text{Sink1}, \text{Sink2}, \text{Sink3})$, E 代表着相邻 Agent 间可通信的一条链路 e 。每个节点的剩余能量标注在每个节点的旁边, R_j 表示 Agent j 的剩余能量。为方便计算, 我们假设链路 e 上的值表示两节点间数据传输所消耗的能量值 (跳数因素对节点能量消耗不包含在内, 另外考虑)。比如源节点和 $V2$ 之间的数据传输的能量消耗是 2, 另外还要考虑跳数对节点能量的影响。为了进行性能比较, 增加了多 Sink 传感网中的最小能量消耗路由算法的能量消耗分析。

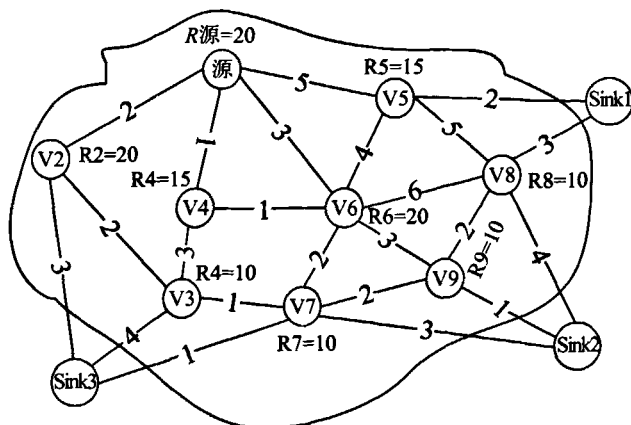


图 1 节点拓扑能量示意图

基于最小能量消耗路由算法:

$$\text{Cost}(\text{源}, \text{Sink1}) = \text{cost}(\text{源}, V5) + \text{cost}(V5, \text{Sink1}) = 5 + 2 = 7;$$

$$\text{Cost}(\text{源}, \text{Sink2}) = \text{cost}(\text{源}, V4) + \text{cost}(V4, V6) + \text{cost}(V6, V9) + \text{cost}(V9, \text{Sink2}) = 1 + 1 + 3 + 1 = 6;$$

$Cost(\text{源}, \text{Sink3}) = cost(\text{源}, \text{V2}) + cost(\text{V2}, \text{Sink3}) = 2 + 3 = 5$ 。

根据该算法,我们选择源-V2-Sink3 作为传送数据的路由。数据传送的次数为 $20/3 = 6$ 。

下面具体分析多 Sink 传感网中基于 Q 学习算法的路由选择机制。

Agent 不必知道网络的拓扑结构,只须获得每

个节点的 Q 值和到达下个节点的回报值,就能通过不断地迭代找到最优路径。通过 Sink 节点周期性的向源节点发送学习训练消息更新节点的 Q 值表,更新规则为式(2),Sink 节点的剩余能量始终保持在 40,Q 的初始值设为 40。

先考虑第一个周期 $T=1$ 。表 1 所示为 $T=1$ 时源节点到各个 Sink 节点路径上的 Q 值。

表 1 建立路由的 Q 表项 $\langle T=1 \rangle$

D	源,2,Sink3	源,4,3,Sink3	源,4,6,7Sink3	源,6,7,Sink3	源,5,6,7,Sink3
Q	19.3983	50.0895	63.1101	47.0198	48.3438
D	源,6,9,Sink2	源,6,7,Sink2	源,4,3,7,Sink2	源,6,8,Sink2	源,5,8,Sink2
Q	45.8208	21.7266	30.2286	14.6217	12.9790
D	源,5,Sink1	源,5,8,Sink1	源,6,8,Sink1	源,4,6,8,Sink1	源,6,9,8,Sink1
Q	21.8196	16.3123	17.9550	33.8474	12.3982

$\pi^* = \max_a Q(s, a)$ 。根据 Q 学习算法应该选择 Q 值最大的作为目标传送的 Sink 节点。故应该选择路径为:源-V4-V6-V7-Sink3。若一直沿该路径发送数据,传送的次数为 $10/1 = 10$ 。与最小能量消耗路由算法相比,数据传送的次数增多了,网络的寿命得到了延长。该实例只是分析了一个周期的路由选择。随着 Agent 继续进行数据传送,各 Agent 节点的能量会发生变化,这个时候源节点又会根据路由算法寻找新的路由。对于增强学习算法而言,当第二周期开始寻找路径时,节点的剩余能量为节点原来的能量减去节点间通信消耗的能量。确定了各节点的能量后,就可以根据 Q 算法重新寻找最优路径。如此循环往复,节点每次都能找到一条达到 Sink 节点的最优路径。

第二周期的 Q 评估值的计算是在第一周期基础上进行的,这时节点的剩余能量为第一周期节点剩余能量减去第一周期发送信息消耗的能量,即源、V4、V6、V7 的节点能量有变化,其余节点能量不变。

表 2 建立路由的 Q 表项 $\langle T=2 \rangle$

D	源,2,Sink3	源,4,3,Sink3	源,4,6,7,Sink3	源,6,7,Sink3	源,5,6,7,Sink3
Q	19.3986	49.2431	60.3843	46.2206	47.5649
D	源,6,9,Sink2	源,6,7,Sink2	源,4,3,7,Sink2	源,6,8,Sink2	源,5,8,Sink2
Q	45.3813	19.9136	29.4498	14.1822	12.9790
D	源,5,Sink1	源,5,8,Sink1	源,6,8,Sink1	源,4,6,8,Sink1	源,6,9,8,Sink1
Q	21.8196	16.3123	17.5155	31.5110	11.9938

表 2 表明第二周期内源-V4-V6-V7-Sink3 的 Q 评估值仍然是最大的,故第二周期选择的路径没有变。

为了比较两个算法对传感网网络使用寿命的影响,需要定义一种和数据收集相关的度量标准。实例采用协作寿命来进行度量。协作寿命定义为从传感器网络开始工作时起到第一个传感器节点失效时所经过的传送数据的轮次。图 2 所示是两种算法在不同 Sink 节点数目时协作寿命。横轴表示 Sink 节点数目,纵轴表示传感器的协作寿命。

从图 2 可以看出,在单 Sink 节点时采用两种算法的传感器网络寿命一样,因为单 Sink 节点所形成

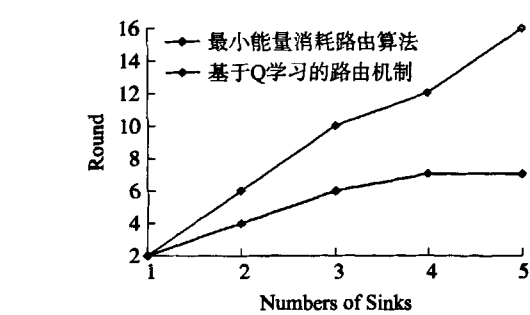


图 2 两种算法生命周期比较

的路由路径是唯一确定的。随着 Sink 节点数目的增加传感网的寿命有显著的提高,因为随着 Sink 节点数量的增加,每个传感器节点到达 Sink 节点的平均

均距离就会减少,那么传送数据所消耗的能量就会减少,从而网络寿命要增加。另外,由于采用 Q 学习方法的路由机制使数据始终沿着能量消耗代价最小的路径进行数据传输,在一定程度上避免了使用剩余能量少的节点转发数据,而最小能量消耗路由路径始终选择的是能量消耗最少的节点发送数据,根本没有考虑到节点的剩余能量。

Q 学习算法具有衡量各节点的能量作用,这是因为该算法具有周期性和即时性,且不以路径上的节点能量消耗少作为唯一择路标准,而是综合考虑了 Agent 节点能量消耗、节点剩余能量值、跳数、距离等,因而相对而言考虑较为全面,能发掘出更合适的路径出来。

5 结束语

本文研究基于 Q 学习的多 Sink 无线传感网路由机制。该机制综合网络节点的剩余能量和节点间消耗能量值以及跳数、距离,通过不断迭代找到到达各 Sink 节点的最优路径。Sink 节点周期性的向源节点发出学习训练消息,各节点根据自己当时所处的状态不断的学习训练,使 Q 值表在不断的更新,不断地选择最优的路径,因而每次传送数据都能很好的平衡能量。该机制还能防止由于节点故障导致的路径失效。通过实例分析,我们看出该机制相比于最小能量消耗路由算法大大延长了网络的生命周期,并且随着 Sink 节点数目的增加,Q 学习方法的优越性越来越明显。

参考文献:

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学

出版社,2005. 1-57.

- [2] 姚怡,覃华,苏一丹. 基于 Q-learning 的自适应容错路由算法的研究[J]. 计算机工程与应用,2006(10):123-125.
- [3] 薛丽华,殷荻茗. 多智能体协作学习方法的研究[D]:[硕士学位论文]. 长沙:长沙理工大学,2008.
- [4] 褚建华,李大学. Q-learning 强化学习算法改进及其应用研究[D]:[硕士学位论文]. 北京:北京化工大学,2009.
- [5] Anna Egorova-Forster, Amy L Murphy. Exploiting Reinforcement Learning for Multiple Sink Routing in WSN[C]//2007 IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems (MASS 2007), 8 October-11 October 2007:1-3.
- [6] Ping Wang, Ting Wang. Adaptive Routing for Sensor Networks using Reinforcement Learning [C]//2006 The Sixth IEEE International Conference on Computer and Information Technology (CIT 2006), September 2006:219-225.
- [7] Pietro Ciciriello, Luca Mottola, Gian Pietro Picco. Efficient Routing from Multiple Sources to Multiple Sinks in Wireless Sensor Networks[J]. Computer Science, 2007, 4373(10):34-50.
- [8] Min Meng, Xiaoling Wu, Hui Xu, et al. Energy Efficient Routing in Multiple Sink Sensor Networks[C]//2007 the Fifth International Conference on computer Science and Applications, Berlin: Springer. 26-29 August 2007:561-566.
- [9] Chen Yue-quan, Chane, Han Song. Energy Efficient Multipath Routing in Large Scale Sensor Networks with Multiple Sink Nodes [C]//Cao J, W Neidl, M Xu, des. Proc of the 6th International Workshop on Advanced Parallel Processing Techniques, Berlin: Springer. 2005:390-399.
- [10] Tom M Mitchell 著,曾华军,张银奎,等译. 机器学习[M]. 北京:机械工业出版社,2003. 263-280.
- [11] 陈志,王汝传,孙力娟. 一种无线传感器网络的多 Agent 系统模型[J]. 电子学报,2007. 35(2):240-243.
- [12] 章韵,王静玉,陈志. 基于 Q 学习的无线传感器网络自组织方法研究[J]. 传感技术学报,2010. 23(11):1623-1626.
- [13] 汪琼,张锋. 无线传感器网络中的节点协作算法研究[J]. 传感技术学报,2006. 19(2):481-485.



周淑俐(1984-),女,湖南株洲人,南京邮电大学硕士研究生,主要研究方向为计算机应用技术、物联网与传感网等,zsl.name@163.com;



章 韵(1963-),男,安徽芜湖人,教授,博士,南京邮电大学硕士生导师,主要研究方向为计算机在通信中的应用、计算机网络等,zhy@njupt.edu.cn;



陈 志(1978-),男,江苏淮安人,副教授,南京大学博士后,南京邮电大学硕士生导师,主要从事传感网与物联网、Agent 与多 Agent 系统、软件工程与服务科学等方面的研究,chenz@njupt.edu.cn;



扈罗全(1972-)男,江苏宜兴人,博士。江苏检验检疫系统学科带头人,苏州大学工程硕士研究生指导老师,已在国内外各类学术刊物和学术会议上发表论文 100 余篇,SCI/EL/ISTP 收录 30 余篇,主要研究方向为无线通信与电磁兼容、随机模型等,hulq@jsciq.gov.cn。