

生物启发的无线传感执行网络协同方法

王艳[†], 纪志成

(江南大学 电气自动化研究所, 江苏 无锡 214122)

摘要: 本文针对无线传感执行网络(wireless sensor and actor network, WSAN), 在昆虫生物种群协作机理的启发下, 提出了一种WSAN协同方法, 以改善网络传输可靠性、节能与执行效率. 首先, 针对传感器节点与执行器节点之间的协作, 提出以信息传递能耗和剩余能量衡量中继节点选择概率的效能协同机制, 以及包含区域中继、影响因子和学习因子3个保障单元的组织协同机制. 进而, 针对执行器-执行器间的协作, 引入学习因子作为组织协同机制中的一个保障单元. 最后, 给出了算法执行的流程, 并通过仿真验证了方法的优越性. 仿真结果表明, 采用本文提出的协同机制, 不但优化了WSAN信息传递路径, 而且在执行器节点间协作中选择优势节点参与信息处理和决策, 降低了网络能耗, 同时提高了网络执行效率.

关键词: 无线传感执行网络; 生物; 群体; 协同; 能量

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Bio-inspired collaborative method for wireless sensor and actor network

WANG Yan[†], JI Zhi-cheng

(Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

Abstract: Motivated by the colony insect collaborative mechanism, we propose a collaborative method for wireless sensor and actor network (WSAN) to improve the performance of transmission reliability, energy-saving and network execution efficiency. First, for the collaboration of the sensor-actuator, an efficient collaboration mechanism is presented to judge the selection probability of relay nodes from the transmission energy consumption and the residual energy. Meanwhile, an organic collaboration mechanism composed by three support units of regional relay, impact factor and learning factor is introduced. Then, leaning factor is used as a support unit in the organic coordination for the actuators collaboration. Finally, the execution flow is given and a numerical example is used to validate the advantages of the proposed method. The simulation results show that, it can optimize the transmission path in WSAN, as well as the actuators with good collaborative performance can be preferentially selected to work in information processing and decision. The method performs well in energy-saving and effective execution for WSAN.

Key words: wireless sensor and actor network; biology; colony; collaboration; energy

1 引言(Introduction)

无线传感执行网络(wireless sensor and actor network, WSAN)是近年来提出的新型网络模型, 它在无线传感器网络的基础上引入若干执行器节点, 形成复杂的分布式传感与控制系统. 无线传感执行网络通过播撒在各个空间区域内的传感器节点监测、感知和采集监测事件源信息, 并以多跳自组织的方式传送到执行器节点, 执行器节点根据收集到的监测信息做出并执行相关操作, 从而实现传感器节点、外部环境、执行器节点之间的实时动态的交互^[1-3].

在WSAN中, 事件发生区域内的所有节点通过互相协作, 在尽可能使用最小资源的情况下, 共同有效地完成任务. 与无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)不同, 由于执行器节点的加入, 使得网络

中节点的属性、通信、节点任务更为复杂, 节点间的高效协同是提高网络的运行性能的必经之路. 尽管无线传感器网络领域已取得了丰富的研究成果, 但执行器节点间、传感器-执行器间协同等问题的介入, 使得现有的WSN成果直接应用到WSAN中需重新审视. 而针对WSAN的研究尚处于起步阶段, 研究成果亦不多见. 为了使WANS具有更好的可靠性、实时性等, 文献[4]提出一种采用动态确认方式提高一定时间内执行器节点之间通信可靠性, 通过探测网络拥塞、路由变化等完成对发送端发送功率的调整, 控制冗余信息最少的情况下, 满足可靠性. 文献[5]提出了一种半被动协同方式(semi-passive coordination, SPC)的执行器节点间的协作算法, 从统计的角度提高了执行器节点接收数据的正确性及决策的可靠性. 通过节点间的交

互, 提高了主节点接收信息的可靠性及全面性, 同时通过域内集中控制的方式, 在一定程度上消除了冗余操作. 但是算法对时钟的依赖性及域内复杂的交互流程会影响算法的可扩展性及实用性. 文献[6]提出一种便于执行器节点之间协作执行任务的路由服务, 在多个最近的执行器节点之间, 寻找进行信息交互的最优路由.

随着无线通信技术和生物技术的高速发展, 仿生物智能机理来解决复杂无线通信问题日益为众多研究者们所关注. 任何一种生物其自身结构的合理性和对外部环境的适应性^[7-8], 是文献[4-6]研究设计所欠缺的. 目前, 已有少部分由生物机理的启发对WSN性能方面的相关研究, 像文献[9]基于蛙体随体行为机理, 提出技能休眠方法, 自适应网络环境变化, 提高节能有效性. 文献[10]根据植物根系系统和微生物根际土壤之间相互作用机理, 建立由移动传感器节点组成的WSN框架, 均衡网络能量消耗、延长网络寿命等, 而由生物启发研究WSAN中协同作用的相关参考文献很少.

基于此, 本文针对WSAN中传感器-传感器、传感器-执行器间的协同问题, 在昆虫这一生物群体协作机理的启发下, 以传输可靠性、节能、网络执行效率为设计目标, 提出了一种生物启发的WSAN节点间的协同方法. 该方法根据昆虫群体对外部环境的适应性, 通过昆虫群体协作的生物机理, 使节能设计以更合理的方式存在于WSAN监测环境中, 该方法在昆虫协同作用的指导下, 从效能协同和组织协同两方面做了深入研究, 并通过仿真分析该协同作用在提高网络性能上的有效性.

2 WSN网络模型(WSAN network model)

2.1 问题描述(Problem description)

在WSAN中, 典型的协议栈模型^[1]如图1所示. WSN网络中高效工作的前提条件是传感器节点之间、传感器节点与执行器节点、执行器节点与执行器节点之间的有效协作. 因此, 本节基于昆虫群体协作机理的WSAN协同方法主要从两个方面展开: 1) 传感器节点与执行器节点之间的协作, 包括效能协同和组织协同, 选择信息传送的传感器节点和传送路径, 把事件信息快速可靠地的传到执行器节点, 以便执行器

节点根据可靠信息做出任务执行决策. 2) 执行器节点和执行器节点之间的协作, 在事件发生监测环境中选择最佳数量和最佳执行器节点采用任务分配决策.

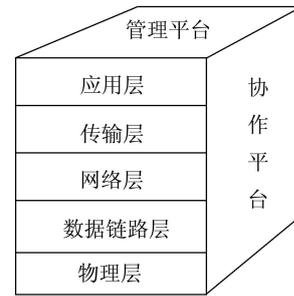


图 1 WSN协议栈

Fig. 1 WSN protocol stack

2.2 昆虫群体协作机理(Insect colony mechanism)

昆虫群体执行任务过程中, 分配任务给昆虫个体, 昆虫个体执行任务的相关刺激强度大于响应门限时, 昆虫执行任务. 每个昆虫都存在执行任务的可能性, 昆虫群体选择其中执行任务可能性较大的昆虫个体相互协作执行任务, 以优势资源高效完成任务.

根据昆虫群体协作机理^[11], 任务被执行的概率与两个因素有关: ① 昆虫个体执行任务的刺激强度, 例如一种化学物质的浓度、感应强度等; ② 执行任务的响应门限. 所以昆虫个体执行任务的概率是关于相关刺激强度和响应门限的函数, 其数学表达式如下^[11]:

$$P(s_i) = \frac{s_i^v}{s_i^v + t_h^v}, \quad (1)$$

其中: s_i 为任务的相关刺激强度; t_h 为执行任务的响应门限; $P(s_i)$ 为执行任务的概率; $v (v > 1)$ 为决定执行任务概率的变化幅值. 昆虫个体之间较强的协作能力可以提高完成任务的效率和节省完成任务所利用的资源. 同样的, 在WSAN中, 传感器节点之间的协作, 可以有效完成传感器节点和执行器节点之间的有效通信, 由传感器节点和执行器节点协作以及执行器节点之间的协作完成信息感知和执行任务操作, 提高网络通信可靠性和节省网络能量等. 基于昆虫群体协作机理, 完成WSAN中传感器节点和执行器节点以及执行器节点之间的协作, 其中昆虫群体和WSAN的对应关系如表1所示.

表 1 昆虫群体和WSAN协同的对应关系

Table 1 Corresponding relationship between insect colony and WSN

昆虫群体	传感器-执行器间协同	执行器-执行器间协同
昆虫个体	传感器节点	执行器节点
被给与任务的昆虫个体	参与通信的传感器节点	参与任务的执行器节点
任务	传递事件信息	分析、执行决策
任务刺激强度	节点剩余能量	接收到的数据包数目
响应门限	能量消耗	估计事件属性需要的数据包数目
昆虫个体执行任务的概率	被选为通信节点的概率	执行器节点对事件做出反应的概率

3 无线传感执行网络的协同方法 (WSAN collaboration method)

3.1 传感器节点与执行器节点之间的协同(Collaboration between sensors and actuators)

在WSAN中, 当有事件发生后, 感知到事件的多个传感器节点把采集的信息以多条路径传递给一定范围内的多个执行器节点. 为了使执行器节点快速可靠地对事件信息做出回应, 尤为重要的是在网络中选择优势传感器节点相互协作完成信息的传递过程. 本文采用区域中继机制^[12], 在中继区域内选择下一跳节点, 减少选择节点的数目, 提高选择效率.

定义1 一跳中继区域 V : 如图2所示, 发送节点, 执行器节点, 以“---”为角平分线, 节点的最大传输距离为半径, 角度为 θ 的扇形区域为发送节点的一跳中继区域 V .

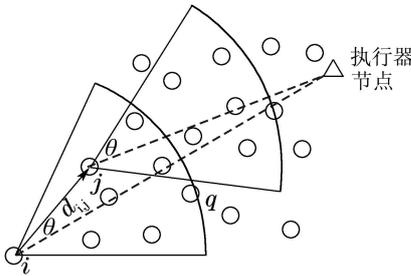


图2 中继区域

Fig. 2 Relay region

基于昆虫群体协作机理, 提出WSAN中传感器节点和执行器节点之间的协作算法. 在WSAN网络中, 若节点 i 感知到事件信息, 并要传递到距离节点 i 最近的执行器节点, 若节点 i 与下一跳节点 j 的距离为 $d_{i,j}$, 根据节点 i 的剩余能量和节点 i 传递信息到节点 j 消耗的能量, 计算节点 i 与节点 j 之间执行通信的概率 $P_{i,j}$. 节点参与数据采集的能量消耗与 $d_{i,j}$ 的大小有关, 所以响应门限可以由事件源与节点之间的距离 $d_{i,j}^m$ 表示, 参数 m 满足关系 $2 \leq m \leq 5$ ^[15], 节点 i 与其下一跳节点 j 进行信息传递的概率计算式可表示为

$$P_{i,j} = \frac{Q_i^v}{Q_i^v + \vartheta_{i,j}^v} = \frac{Q_i^v}{Q_i^v + \alpha \cdot (d_{i,j}^m)^v}, \quad (2)$$

其中: Q_i 为节点 i 的剩余能量, $\vartheta_{i,j}$ 为响应门限, 即节点 i 与节点 j 之间相互传递数据信息消耗的能量, $v(v > 1)$ 为决定执行任务概率的变化幅值, $d_{i,j}$ 是节点 i 与节点 j 之间的距离, $\alpha(\alpha > 0)$ 用于调节 Q_i 和 $d_{i,j}^m$ 之间相互影响的影响因子.

当 $d_{i,j}$ 减小时, $P_{i,j}$ 增大. 所以, 节点 i 的所有下一跳节点中, 最大概率节点是距离节点 i 最近的节点, 即能量消耗最小的节点. 随着节点 i 剩余能量的减

小, 若要维持 $P_{i,j}$ 在一定水平, 则节点 i 与其下一跳节点的距离 $d_{i,j}$ 需要减小. 即随着节点 i 剩余能量的减小, 信息传递的下一跳节点的跳距将减小, 则会增加信息传递的跳数, 进而增加丢包、时延等, 网络通信的可靠性下降. 由此可见, 中继节点与发送节点之间的一个平衡距离可以在数据包传递可靠容忍度内达到能耗最少. 在智能群体群集运动控制中, 利用势场函数对智能体加以控制, 解决智能群体的编队问题和实现避障^[13]. 本文引入势场函数作为式(2)中的影响因子 α , 优化静态无线传感器节点的数据包传递路径. $d_{i,j}$ 是影响数据包传输的可靠性和能量消耗的重要因素, 以关于 $d_{i,j}$ 的势场函数对中继节点的选择概率进行调整.

定义2 势场函数^[13] $U_{i,j}$. $U_{i,j}$ 是关于无线传感器节点与其下一跳节点之间距离 $\|q_j - q_i\|$ 可微、非负、无界的函数, 且满足:

- 1) $\|q_j - q_i\| \rightarrow 0$ 时, $U_{i,j}(\|q_j - q_i\|) \rightarrow \infty$;
- 2) $U_{i,j}$ 在一定距离处取得唯一的最小值

$$U_{i,j}(\|q_j - q_i\|) = c \cdot \left[\frac{d_0^2}{\|q_j - q_i\|^2} + \ln(\|q_j - q_i\|^2) \right],$$

其中: $c > 0, d_0 > 0$. 若令 $d_{i,j} = \|q_j - q_i\|$, 则

$$U_{i,j}(d_{i,j}) = c \cdot \left[\frac{d_0^2}{d_{i,j}^2} + \ln(d_{i,j}^2) \right],$$

$$\frac{dU_{i,j}(d_{i,j})}{dz} = \frac{2c(d_{i,j}^2 - d_0^2)}{d_{i,j}^3}.$$

因此, 势场函数在 $d_{i,j} = d_0$ 时取得最小值, 预先给定平衡距离 d_0 , 当大于 d_0 时, 能量消耗增大; 小于 d_0 时, 跳数增加, 丢包、时延增加, 降低数据包传递可靠性.

节点 i 与其下一跳节点 j 进行信息传递的概率计算式表示为

$$P_{i,j} = \frac{Q_i^v}{Q_i^v + \vartheta_{i,j}^v} = \frac{Q_i^v}{Q_i^v + U_{i,j}(d_{i,j}) \cdot (d_{i,j}^m)^v}. \quad (3)$$

信息传递路径的可靠性是影响传感器节点与执行器节点协作完成任务的一个重要因素, 因此, 假设WSAN网络中传感器与执行器节点之间在传输时延内可靠通信, 则传感器节点需要以一定的数据包投递率(packet deliver rate, PD)传送到它的下一跳节点, 若采集到的事件信息通过达到一定数据包投递率PD的传感器节点传送到执行器节点, 则可以提供可靠的WSAN网络通信. 为了使传感器节点和执行器节点之间的通信中, 所有的传感器节点都能达到一定的PD, 本文引入学习因子, 目的是在传感器节点之间协作通信过程中记住它们的可以达到一定PD的下一跳节点, 提高传感器节点和执行器节点之

间通信的可靠性. 所以, 节点*i*与其下一跳节点*j*进行信息传递的概率计算式可由式(3)改进为

$$P_{i,j} = \frac{Q_i^v}{Q_i^v + \vartheta_{i,j}^v} = \frac{Q_i^v}{Q_i^v + U(d_{i,j}) \cdot (d_{i,j}^m)^v + L_{i,j}^v}, \quad (4)$$

其中 $L_{i,j}$ 是传感器节点的学习因子, 主要用于决定传感器节点记住或者遗忘它的下一跳节点. 对式(4)中的学习因子分析如下:

- 1) 首先对传感器节点*i*的所有下一跳节点的学习因子设置相同的初始值.
- 2) 在每个传感器节点发送信息到最近执行器节点的路径上, 计算传感器节点*i*与其所有下一跳进行通信的概率 $P_{i,j}$.
- 3) 若传感器节点*i*达到一定的数据包投递率PD, 更新它的下一跳节点*j*的学习因子为 $L_{i,j} = L_{i,j} - \omega$, 增加再次通行时传感器节点*i*对其下一跳节点*j*

的记忆, 提高传感器节点*i*与其下一跳节点*j*之间通信的概率.

- 4) 若传感器节点*i*未达到一定的数据包投递率PD, 更新它的下一跳节点*j*的学习因子为 $L_{i,j} = L_{i,j} + \omega$, 增加再次通行时传感器节点*i*对其下一跳节点*j*的遗忘, 降低传感器节点*i*与其下一跳节点*j*之间通信的概率.

在WSAN网络中, 基于昆虫协作原理提出传感器节点与执行器节点协同通信方法, 该方法中包含效能协同和组织协同. 利用效能协同, 均衡网络能耗, 降低网络节点的能量差异, 提高WSAN网络的整体效能. 利用组织协同, 把信息传递的可靠性和降低能耗两大功能要素划分到不同的保障单元中, 对WSAN网络中传感器节点与执行器节点的通信产生均衡的保障作用. 两类协同的过程和目的具体如表2所示.

表 2 效能协同和组织协同

Table 2 Efficient collaboration and organic collaboration

协同	保障单元	过程	目的
效能协同		通过衡量节点的剩余能量和传递数据包消耗的能量来决定被选为中继节点的概率大小	均衡网络能耗, 促进节点间协同配合通信
组织协同	区域中继机制	以发送节点与执行器节点连线为角平分线, 以最大传输距离为半径, 给定中继节点选择范围	减少选择节点的数目, 提高选择效率, 降低能耗
	影响因子 (用势场函数表示)	用反应数据包传输可靠性与能耗之间的相互作用函数影响中继节点的选择概率	数据包传递可靠容忍度内达到能耗最少
	学习因子	根据发送节点的数据包投递率更新学习因子, 决定传感器节点记住或者遗忘它的下一跳节点, 进而影响中继节点的选择概率	提高传感器节点和执行器节点之间通信的可靠性

3.2 执行器节点间的协同(Collaboration among actuators)

在WSAN中, 传感器节点把事件信息传递给多个执行器节点, 执行器节点之间相互协调, 选择合适的执行器节点对事件信息做出回应. 根据昆虫群体协作机理, 昆虫个体执行任务的概率计算函数如式(1)所示, 每个昆虫个体受到的任务刺激度大于响应门限, 则该昆虫个体有较大的概率去执行任务. 相似地, 在WSAN网络中, 执行器节点执行任务的概率取决于该执行器节点对事件属性的可靠估计. 同时在执行器节点之间协同作用中, 引入学习因子, 增加执行器节点对发生事件的记住或是遗忘. 定义 PA_k 为执行器节点执行任务的概率, 基于昆虫群体协作机理启发建立执行器节点之间协作模型, 执行器节点执行任务的概率 PA_k 的计算式如下所示:

$$PA_k = \frac{S_k^v}{S_k^v + R_k^v + N_k^v}, \quad (5)$$

其中: S_k 为执行器节点*k*在时间间隔*t*内收到的数据包数目, R_k 为可靠估计事件属性需要的数据包数目, $v(v > 1)$ 为决定执行任务概率的变化幅值, N_k 为执行器节点的学习因子.

当执行器节点*k*在每个时间间隔*t*内收到的数据包数目超过可靠估计事件属性需要的数据包数目, 即 S_k 大于 R_k , 执行器节点*k*执行任务的概率 PA_k 较大, 表明执行器节点*k*可以可靠的估计该事件属性并执行该任务. 反之, 表明执行器节点*k*不能可靠的估计该事件属性并且阻止该执行器节点执行任务, 减少资源损耗.

在执行器节点之间引入学习因子, 用以记住或是遗忘事件. 当 $S_k > R_k$ 时, 记住该事件, 更新执行

器节点 k 的学习因子为

$$N_k = N_k - \beta, \beta > 0,$$

增大执行器节点 k 执行任务的概率 PA_k ; 当 $S_k < R_k$ 时, 遗忘该事件, 更新执行器节点 k 的学习因子为

$$N_k = N_k + \beta, \beta > 0,$$

减小执行器节点 k 执行任务的概率 PA_k . 因此, 执行器节点执行任务需要收集足够的事件信息.

在传感器节点与执行器节点协同完成信息的有效汇集后, 由执行器节点之间的相互协同完成信息的处理与决策, 并执行相关操作. 按照本文提出的执行器节点执行任务的概率, 选择概率高的执行节点决策和处理信息, 降低WSAN网络能耗, 同时保证执行器节点正确的决策和执行相关操作. WSAN协同设计方法流程图如图3所示.

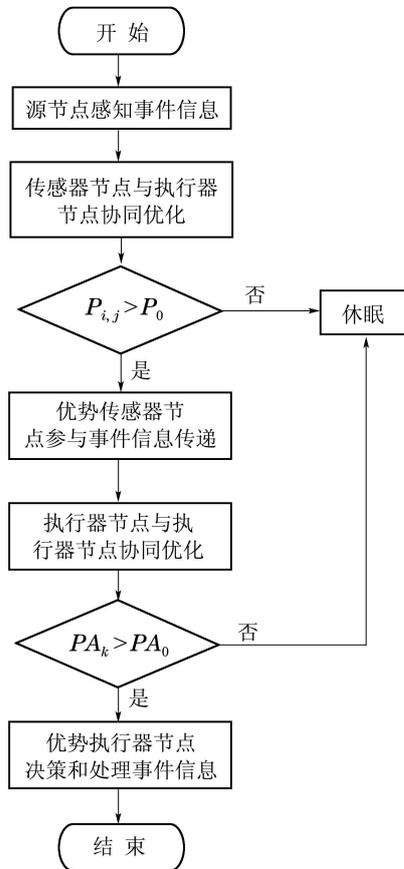


图3 WSAN协议栈

Fig. 3 Flow of WSAN collaboration method

4 仿真(Simulation)

对本文提出的WSAN网络的生物启发协同方法研究, 假设在 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ 的监测区域, 随机部署100个传感器节点, 在监测边缘区域放置8个执行器节点, 事件发生区域是在以中心位置(50, 50)为圆心,

半径为5m的圆形区域^[14]. 传输每比特数据耗能为

$$E_e = 2E_{\text{elec}} + \gamma \cdot d^4.$$

其中仿真试验参数如下面的表3所示.

表3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters

参数	参数值
节点通信半径	20 m
传感器节点学习因子初值 L_0	2×10^4
执行器节点学习因子初值 N_0	100
ω	10^3
β	5
γ	10PJ/(bit · m ⁴)
节点初始能量 Q	5 J
E_{elec}	50 nJ/bit
采样频率 f	10 ms
丢包率 λ	0.2
v	5
m	4

在WSAN网络中, 采用文中提出的协同方法, 给出组织协同作用3个保障单元分别对网络性能的影响以及整体节能效果与文献[6]中方法的对比和分析. 组织作用协同3个保障单元为: 区域中继机制、影响因子和学习因子. 仿真结果如图4-8所示.

图4是中继区域角 θ 对网络能耗的影响, 在该仿真中, 取平衡距离 $d_0 = 10\text{ m}$. 如图可知当 θ 小于大约 45° 时, 网络能量消耗随着 θ 减小急剧增大, 当大于大约 150° 时, 网络能耗随着 θ 增加同样急剧增大, 这主要是因为, 当 θ 很小时, 中继区域小, 节点数目小进而最优下一跳节点的选择概率低, 由前文中的分析可知, 下一跳节点的距离大于或小于最优值都会增加网络能耗; 当 θ 很大时, 得到最优下一跳节点的概率增大, 但是同时增大了上传至执行器节点跳数的概率, 进而增大了数据传输中时延、丢包率等.

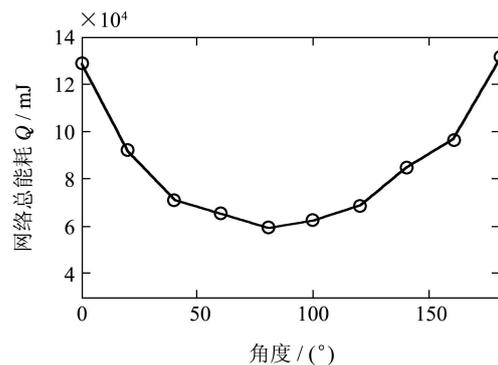


图4 中继区域角 θ 对网络能耗的影响

Fig. 4 Effects of relay region angle θ on energy consumption

图5是影响因子关于节点下一跳距离的函数特性, 以及平衡距离的选择对网络能耗的影响. 取中继区域角 $\theta = 80^\circ$. 由图5可知, 本文引入的影响因子在 d_0 处取得极小值, d_0 即为平衡距离, 可调节节点选择概率进而影响WSAN网络能量消耗, 对平衡距离 d_0 在 $[1, 10]$ 区间内取10个值, 每个 d_0 值在相同条件下分别经过50次实验, 得出网络能耗的每次平均值, 其变化曲线如图6所示, 由图可知平衡距离较小或者较大都会导致网络能耗的增加, 原因在于下一跳节点距离越大, 一跳信息传输耗能增大, 而一跳距离越小, 跳数增加, 传输期间的时延、丢包率增加, 数据包重传率增大, 网络耗能同样成增大趋势.

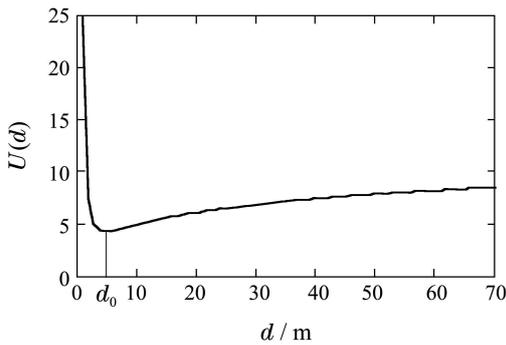


图 5 影响因子关于节点下一跳距离的函数特性
Fig. 5 Function characteristics of next hop distance on the impact factor

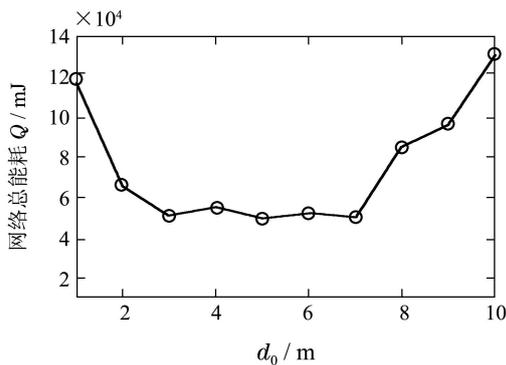


图 6 平衡距离的选择对网络能耗的影响
Fig. 6 Effect of balance distance on the network energy consumption

图7为引入学习因子对执行器节点数据包接收率的影响, 由图可知, 学习因子的引入可增大执行器节点单位时间内接收到的数据包数量, 进而可知网络可靠性增加, 同时提高网络决策效率, 这主要由于在传感器节点上传执行器节点期间, 学习因子的引入, 决定传感器节点记住或者遗忘它的下一跳节点, 进而影响中继节点的选择概率, 优化信息传递路径, 提高网络通信可靠性; 在执行器节点与执行器节点选择期间, 引入学习因子, 增加执行器节

点对发生事件的记住或是遗忘, 提高执行器节点的选择概率的差分度, 提高执行器节点的决策效率.

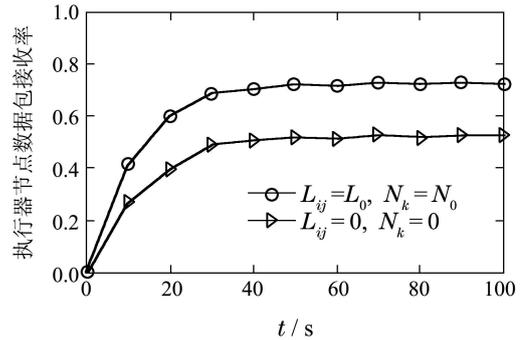


图 7 引入学习因子对执行器节点数据包接收率的影响
Fig. 7 Effect of introducing learning factor on the actuator receiving rate

图8为本文中对WSAN基于昆虫协作机理的协同方法与文献[6]中提出的执行器节点协作的路由算法在整体节能效果上的对比. 由图可以看出, 本文提出的协同方法节能效果较优, 并随着网络工作时间的增加, 效果更加明显. 究其原因, 在于文献[6]中方法在传感器节点到执行器节点之间设置协调器节点, 通过协调器节点选择接收信息的执行器节点, 大大减少了执行器节点的耗能, 在节能方面达到一定的效果, 但是其网络中协调器节点的能耗相对较大. 而在本文方法中, 采用基于昆虫协作机理的协同方法, 在传感器节点与执行器节点之间, 采用效能协同和组织协同不但优化了信息传递路径, 还在执行器节点与执行器节点的协作中选择优势执行器节点参与信息处理和决策, 降低网络能耗, 同时提高了网络执行效率.

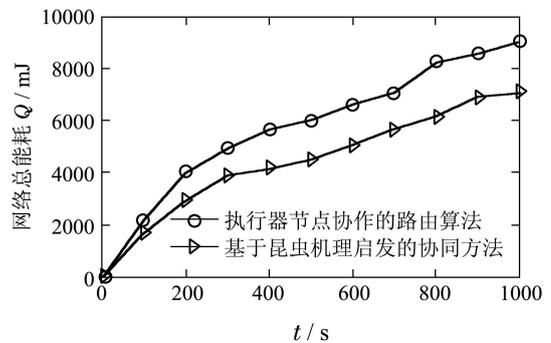


图 8 两种方法的节能效果对比
Fig. 8 Energy-saving performance comparison of two methods

5 结论(Conclusion)

本文针对新兴的WSAN网络中的协同问题, 在昆虫群体这一生物种群协作机理的启发下, 提出了一种智能的WSAN节点协同方法, 解决网络中传感器与执行器、执行器与执行器间的协同问题, 从而

提高网络节能、传输可靠性、网络执行效率方面的性能. 针对传感器节点与执行器节点之间的协作, 对效能协同和组织协同两方面做了详细的分析, 效能协同是以信息传递耗能量和剩余能量来衡量中继节点间的选择概率; 组织协同则包括区域中继机制、影响因子和学习因子3个保障单元, 本文给出了3个保障单元对网络性能的影响. 针对执行器节点和执行器节点之间的协作, 引入学习因子, 提高执行器节点的决策效率. 如何在执行器节点间的协同中引入3个保障单元, 及其对网络性能的影响, 是本文后续的研究工作. 此外, 如何将其他生物种群更为智能的协作机制引入到WSAN协同中, 也是值得进行进一步深入研究的课题.

参考文献(References):

- [1] AKTILDIZI, KAS M I. Wireless sensor and act or networks research challenges [J]. *Ad Hoc Networks*, 2004, 2(4): 351 – 367.
- [2] 陈延军, 潘泉, 梁彦. 基于信息量的分布式协同自组织算法 [J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(10): 1391 – 1398.
(CHEN Yanjun, PAN Quan, LIANG Yan. Decentralized collaborative self-organization algorithm based on information content [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(10): 1391 – 1398.)
- [3] XU M D, LEUNG H. A joint fusion, power allocation and delay optimization approach for wireless sensor networks [J]. *Sensors Journal*, 2011, 11(3): 737 – 744.
- [4] GUNGOR V C, AKAN Z B, AKYILDIZ I F. A real real-time and reliable transport (RT)₂ protocol for wireless sensor and actor networks [J]. *IEEE Transactions on Networking*, 2008, 16(2): 359 – 370.
- [5] OZAKI K, HAYASHIBARA N, TAKIZAWA M. Coordination protocols of multiple actuator nodes in a multi-actuator/multi-sensor model [C] // *Proceedings of the 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. Washington: IEEE, 2007: 62 – 67.
- [6] CHANG H J, GWU T P. Coordinator assignment scheme and routing algorithm for wireless sensor and actuator networks [C] // *Proceedings of the 21st International Conference on Education Technology and Computer*. Sydney: IEEE, 2010: 406 – 410.
- [7] VURAN M C, AKYILDIZ I F. Spatial correlation-based collaborative medium access control in wireless sensor networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2006, 14(2): 316 – 329.
- [8] SENEL F, YOUNISM F, AKKAYA K. Bio-inspired relay node placement heuristics for repairing damaged wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(4): 1835 – 1848.
- [9] EHSSAN S, KENJI L, NAOKI W. Bio-inspired layered clustering scheme for self-adaptive control in wireless sensor networks [C] // *Proceedings of the 2nd International Conference on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies*. Bratislava: IEEE, 2009: 1 – 6.
- [10] AKIRA M, MASASHI S, MASAYUKI M. Energy efficient sleep scheduling in wireless sensor networks inspired by satellite behavior of frogs [C] // *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Percom Workshop*. Mannheim: IEEE, 2010: 450 – 455.
- [11] ZHOU L, QU P, SHI Z. Task allocation in multi-agent systems with swarm intelligence of social insects [C] // *Proceedings of the 6th International Conference on Natural Communications*. Yantai: IEEE, 2010: 4322 – 4326.
- [12] 张晚生, 刘凯. 无线网络中基于位置的能量高效协作路由算法 [J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(1): 63 – 68.
(ZHANG Wansheng, LIU Kai. Energy-efficient location-based collaborative routing in wireless networks [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(1): 63 – 68.)
- [13] 俞辉, 王永骥, 程磊. 基于有向网络的智能群体集运动控制 [J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(1): 79 – 83.
(YU Hui, WANG Yongji, CHENG Lei. Flocking motion control of flock in directed networks [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(1): 79 – 83.)
- [14] CHEN J M, CHENG P, YANG X, et al. Distributed collaborative control for industrial automation with wireless sensor and actuator networks [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(12): 4219 – 4230.
- [15] WENDI B H, ANANTHA P C, HARY B. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660 – 670.

作者简介:

王 艳 (1978–), 女, 副教授, 博士, 目前研究方向为网络化控制系统、无线传感器网络, E-mail: wangyan@jiangnan.edu.cn;

纪志成 (1959–), 男, 教授, 博士, 目前研究方向为制造信息化、网络化控制系统, E-mail: zcji@jiangnan.edu.cn.