

集中式无线传感器网络 TDMA 优化调度方案

陈 杰, 易本顺

(武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430079)

摘要: 针对无线传感器网络周期性全局快速数据收集应用场合, 提出了一种新的基于粒子群优化和禁忌搜索的混合算法, 以对这类网络进行多指标 TDMA 优化调度。该算法采用基于熵权的逼近理想解的排序法对算法结果进行客观评价和择优。当网络数据收集任务量一定时, 应用该算法, 只需要较少的时隙数和能耗便可完成任务。仿真结果证实, 算法搜索效率高, 能改善网络 TDMA 调度效果, 且比已经提出的一些 TDMA 调度算法性能优越。

关键词: 无线传感器网络; 时分复用; 多指标优化; 粒子群优化; 禁忌搜索; 逼近理想解的排序法

中图分类号: TP 393 **文献标志码:** A

Centralized optimized TDMA scheduling scheme for wireless sensor networks

CHEN Jie, YI Ben-shun

(School of Electronic Information, Wuhan Univ., Wuhan 430079, China)

Abstract: A novel hybrid algorithm based on particle swarm optimization and tabu search is proposed for multi-objective optimized TDMA scheduling in the applications for wireless sensor networks which require periodic global data snapshots, and weighted entropy based technique for order preference by similarity to ideal solution is introduced to evaluate and choose the result of the algorithm objectively. When the amount of data collection tasks of the network is constant, it needs only fewer slots and energy expenditure to complete them by using the algorithm. Simulation results validate that the proposed scheme has a highly search efficiency and can improve the effect of the TDMA scheduling on wireless sensor networks and outperforms compared with that of other algorithms.

Keywords: wireless sensor network (WSN); time division multiple access (TDMA); multi-objective optimization; particle swarm optimization (PSO); tabu search (TS); technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)

0 引言

近年来, 无线传感器网络由于在目标探测和跟踪、环境监测、工业过程监控以及军事应用上具有广泛的应用前景, 备受研究者瞩目。其中, 节能设计是无线传感器网络设计的关键^[1]。然而, 无线通信模块空闲状态和接收状态能耗接近, 睡眠状态能耗最少^[2]。因此, 无线传感器网络必须利用节点工作状态的转换, 使节点在网络正常运作下尽快进入睡眠状态, 关闭通信模块, 高效使用能量, 延长网络生命周期。从协议设计角度看, 高效的节点 MAC 层休眠/唤醒调度机制对无线传感器网络非常重要。

众所周知, TDMA 较基于竞争的 MAC 协议具有限制传输时延和避免冲突的优点^[3]。在高数据率的冲突易发网络环境下, 发生碰撞后的数据重发容易产生时延和额外的能量消耗。因此, 在如节点剩余能量监测、多目标定位或区

域环境监测等需要周期性全局快速数据收集的应用中, 使用 TDMA 调度算法能获得更好的运行效果。

到目前为止, 研究者们提出了许多基于时分复用的 MAC 协议。在文献[4]中, 时间被分割成 32 个等长时隙, 形成一个固定长度的帧结构, 每个节点控制该帧中的一个时隙, 避免发生冲突。文献[5]采用了基于簇的 TDMA 调度思想, 增强了 TDMA 的可扩展性、降低了数据分组的发送延迟以及延长了网络的生命周期。文献[6]在关注数据包传输次序的基础上, 基于图着色算法, 提出了 3 种以最短任务完成时间为目标的算法, 并指出了数据收集网络的时隙调度和分配是一个 NP 问题。上述方法都存在时隙利用率不高, 时隙调度效果有待优化的问题。文献[7]提出了一种以同时优化时隙总数和能耗两个指标为目的的多指标 TDMA 调度方案, 利用粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 和遗传算法 (genetic algorithm, GA) 的混合算法进行迭代搜

索,以得到较优的调度方式。文献[8]将 GA 替换为具有较好本地搜索能力的模拟退火算法(simulated annealing, SA),上述两种混合算法获得了很好的调度效果,但计算开销大、搜索效率低,调度效果仍有待优化,且两种算法都没对解做出客观合理的评价。

本文针对无线传感器网络周期性全局快速数据收集应用场合,提出了一种基于 PSO 和禁忌搜索(tabu search, TS)的混合算法 HPT,以这类网络进行多指标 TDMA 优化调度,将其 TS 嵌入到基于遗传运算的 PSO 算法中,形成性能互补的算法,以对 PSO 的解进行改善,并采用基于熵权的逼近理想解的排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)多目标评价机制对调度方案进行客观评价,算法操作简单、搜索效率高,最终能获得性能更优的运行效果。

1 TDMA 调度问题描述

1.1 网络模型和调度模型

假定网络各节点能够维持时间同步,其中只包含一个汇聚节点,利用路由算法(如 GSPR 算法^[9])给普通节点建立一个植根于汇聚节点的路由树,将传感器产生的数据传递给离目的节点最近的父节点,通过多跳的方式到达汇聚节点。另外假设各节点的数据包长度相等,每个时隙的长度恰可以保证节点完整地接收或发送一个数据包,并且在每一轮的汇聚传输中各节点有且只有一个数据包需要发送。

每间隔一定的时间,汇聚节点发起一次更新过程,重新建立节点之间的路由梯度关系以及对网络进行 TDMA 优化调度,以适应网络动态的变化。在路由树的建立结束后,节点将其路由梯度关系以及邻居节点信息告知汇聚节点,汇聚节点以此作为调度的依据,只有当两节点相距大于两跳范围时,才允许其在同一个时隙内进行数据的发送,且认为无冲突。

对于上述网络模型,其 TDMA 时隙调度模型可描述如下:有一批由传感器节点产生的数据包需经路由树传送到汇聚节点,其中一个数据包从源节点传输到达汇聚节点的数据收集过程称为一个任务。根据其传输路由,每个任务由一个发送行为序列构成,其中每个发送行为称为一个子任务,一个子任务对应一对执行节点并占用一个时隙。TDMA 调度的目的就是给所有的子任务分配时隙,安排节点进行数据的发送和接收,完成所有数据包的收集任务,而且在数据包的传输过程中所有的执行节点不发生信道冲突,整个任务完成所需时隙总数和总能耗应尽量小。

1.2 优化目标

频繁地关闭/开启无线通信模块也会消耗大量的能量,因此将唤醒和休眠状态之间的切换所消耗的能量考虑在内,如任务完成所需时隙数为 f_1 ,网络总能耗为 f_2 ,则

$$f_1 = \text{Totalslots} \quad (1)$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^N [P_i^{tx}(t_i^{tx} + t_i^{tx-rx}) + P_i^{rx}(t_i^{rx} + t_i^{rx-tx})] \quad (2)$$

式中, N 为节点总数; P_i^{tx} 和 P_i^{rx} 分别表示节点 i 的发送功率和接收功率; t_i^{tx-rx} 和 t_i^{rx-tx} 为节点 i 在发送和接收状态与睡眠状态之间的切换时间总和; t_i^{tx} 和 t_i^{rx} 则分别是节点 i 完成这批任务所需要的总的发送时间和接收时间。由式(2)知,在网络拓扑和数据收集任务一定的条件下,追求网络总能耗最小就是要求切换能量消耗最小。

2 TDMA 调度的个体表达

采用进化算法用于解决优化问题,最重要的步骤是在个体表达和问题解之间找到合适的映射方法,这样才能把个体的搜索空间限定在问题的解空间内,并通过在此空间内进行最优解的搜索来达到问题求解的目的。

2.1 个体的编码和解码

根据上述的调度模型,一批数据包的总传输任务可以用所有子任务的一个序列来表示。标记一个子任务为(任务编号,序列号),其中任务编号为该子任务所属的任务,序列号为该子任务在所属任务中执行的顺序号。于是,可将这个子任务序列映射为一个点序列。其中,一个任务编号出现的次序可以暗示其对应的子任务序列号,因此可顺序取出点序列中的任务编号作为这个子任务序列所对应的编码序列,也作为其所对应的个体表达。按照这个编码规则,一个个体就可以随机方式生成。

根据个体的编码规则可以得到其解码规则。首先,将一个个体转换为一个子任务的序列。然后,依序给每个子任务分配时隙。同时,在无冲突的条件下,将尽可能多的子任务配置在同一时隙。至此,个体与 TDMA 调度方案(解)之间的映射关系便已完全建立。

2.2 评价机制

TDMA 调度中的任务完成时隙数和网络总能耗两个指标存在着冲突,在网络任务一定的条件下,网络总能耗要最小就是要求切换能量消耗最小,也就是要求节点的工作连续性好,这就意味着父节点应收集完所有子节点的数据包之后才统一进行下跳传输,这势必会增加任务完成总的时隙数,反之亦然。对于这类问题,文献[7]的加权和方法难以充分评价解的优劣性,本文采用易于实现、评价合理的基于熵权的 TOPSIS 评价机制^[10],以得到较为客观的评价结果。具体步骤描述如下。

步骤 1 建立决策矩阵

由于优化指标为 f_1 和 f_2 ,如果有 m 种调度方案,则对应的决策矩阵为

$$\begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \\ \vdots & \vdots \\ f_{m1} & f_{m2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, f_{ij} 为第 i 种调度方案时指标 f_j ($i=1,2,\dots,m;j=1,$

2) 的评价值。

步骤 2 计算规范化矩阵

由于各指标通常具有不同的量纲,无法进行直接比较,所以必须对目标值矩阵进行规范化,得到规范化矩阵 $R=[r_{ij}]_{m \times 2}$,其中

$$r_{ij} = f_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m f_{ij}^2} \quad (4)$$

步骤 3 确定评价指标的输出信息熵

在信息论中,信息熵是系统无序程度的度量。输出信息熵的计算公式为

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m r_{ij} \ln r_{ij} \quad (5)$$

且当 $r_{ij}=0$ 时,规定 $r_{ij} \ln r_{ij}=0$ 。

步骤 4 计算指标的权重

根据熵权法理论,综合评价中某项指标的指标值变异程度越大,信息熵越小,该指标提供的信息量越大,该指标的权重也应越大;反之,该指标的权重应越小。因此,根据各项指标值的变异程度,利用信息熵的方法来计算各指标的权重,即

$$w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{k=1}^2 (1 - E_k)} \quad (6)$$

步骤 5 构造加权规范化矩阵

为了反映各因素的重要程度不同,将规范化的数据加权,构成加权规范化矩阵

$$Z = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} \\ \vdots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \\ \vdots & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

步骤 6 确定正理想解和负理想解

由于指标都是成本型,则正理想解和负理想解分别为

$$Z^+ = \{Z_1^+, Z_2^+\}, Z_j^+ = \min z_{ij} \quad (8)$$

$$Z^- = \{Z_1^-, Z_2^-\}, Z_j^- = \max z_{ij} \quad (9)$$

步骤 7 计算各评价对象与正理想解和负理想解之间的距离

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^2 (z_{ij} - Z_j^+)^2} \quad (10)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^2 (z_{ij} - Z_j^-)^2} \quad (11)$$

步骤 8 确定相对接近度

评价对象与理想解的相对接近度为

$$D_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (12)$$

根据 D_i 的大小,将评价对象的相对接近度进行排序,值越大,相应的评价对象性能越优。

3 基本粒子群优化算法

粒子群优化算法是一种进化计算技术,最早由 Kenney

与 Eberhart 于 1995 年提出,初始在解空间中随机的引入一组“潜力”解,通过模仿鸟群捕食的行为和通信机制,迭代搜寻达到最优值。在 PSO 中,每个优化问题的解看作搜索空间中的一只鸟,称之为“粒子”,追随当前的最优粒子在搜索空间中搜索,每个粒子有一个根据它自身经历和它同伴所分享的全局最优信息进行动态调整的飞翔速度,使得整个种群朝着最优的位置收敛。整个过程的迭代方程如下

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 \xi (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \eta (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (13)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (14)$$

式中, v_{id} 和 x_{id} 分别是粒子 i 的速度和位置, i 的位置就是一个个体; p_{id} 为粒子 i 所经历的历史最好位置(个体极值位置); p_{gd} 为所有粒子所经历过的最好位置(全局极值位置); ω 为惯性权重; c_1 和 c_2 为加速系数; ξ, η 是在 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的伪随机数。

4 TDMA 调度混合粒子群优化算法

基本粒子群算法的本质是利用本身信息、个体极值信息和全局极值信息三个信息,指导粒子下一步迭代位置。对于 TDMA 调度问题,其当前位置是一种调度方式,如按照基本的粒子群算法,其速度难以表达,这里采用 GA 的思想解决,式(13)中将 ωv_{id}^k 项看作 GA 的变异操作, $c_1 \xi (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \eta (p_{gd}^k - x_{id}^k)$ 项看作 GA 的交叉操作,使当前解与个体极值和全局极值分别作交叉操作,产生的解发生变异后为新的位置^[11]。由于在变异操作和交叉操作中,新的解可能比原来的解要坏,这里将具有较强邻域局部搜索能力和爬山能力的 TS 嵌入到迭代过程中,将 PSO 的最优化输出群作为 TS 的初始解,能在个体的邻域内依据选择策略和渴望水平寻找到更优,避免早熟现象的发生。以下讨论具体的操作过程。

4.1 变异操作

本文采用逆转策略对个体进行变异操作,以增大变异概率,增强种群多样性。在调度 C_0 中随机地选取第 j_1 次和第 j_2 次子调度,两者之间的子调度顺序以反方向插入,其余不变,此时的调度为新的调度 C_1 。例如, $C_0 = 10110100, j_1 = 2, j_2 = 7$, 则 $C_1 = 10101100$ 。

4.2 交叉操作

首先在第二个串中随机选择一个交叉区域,然后将第二个串的交叉区域加到第一个串之前,随机地删除第一个串中已在第二个串交叉区中出现过的数字。例如,两父串为 10100101 和 001|1001|1, 交叉区域为 1001, 则交叉后可以以为 10011001。

4.3 邻域选优操作

采用禁忌搜索算法对粒子位置进行优化。算法对邻域进行搜索,允许接受劣解,并将最近接受的移动放在禁忌表中,在以后的迭代中加以禁止。如果邻域候选解集中的最

好解满足渴望水平,那么其对应的移动无论是否在禁忌表中都会被破禁接受;倘若不满足,不在禁忌表中较好的解作为下一次迭代的初始解。随着迭代的进行,禁忌表不断更新,经过一定迭代次数后,最早进入禁忌表的移动就从禁忌表中解禁退出。

4.3.1 算法的参数设置

(1) 邻域移动规则

交换调度中任意两个子调度 i 和 j 的位置,形成一个新的调度。

(2) 禁忌表

在禁忌表 T 中存放着被禁忌的对象 (i, j) 。

(3) 渴望水平

当优于历史最优解时,就认为达到了渴望水平。

(4) 停止准则

设置最大的迭代次数为停止准则。

4.3.2 邻域选优算法描述

邻域选优搜索操作的具体算法如下:

begin

对每个粒子的位置 $x, x^* = x, T = \phi$, 规定最大迭代次数 n_{max} ;

while(迭代次数 $< n_{max}$) do

构造 x 的邻域候选解集 $S(x)$, 将 x^* 添加到这个解集中;应用评价机制对 $S(x)$ 中的解进行评价,根据相对接近度值对解的性能进行排序,性能最优解和次优解分别为 \bar{x}_0 和 \bar{x}_1 , 且 $\bar{x}_1 \in S(x)$, \bar{x}_1 对应的 x 的移动不在 T 表中;如果 \bar{x}_0 和 x^* 的相对接近度值满足 $D(\bar{x}_0) > D(x^*)$, 即满足了渴望水平, $x^* = \bar{x}_0, x = \bar{x}_0$, 更新 T 表;如果 $D(\bar{x}_0) = D(x^*), x = \bar{x}_1$, 更新 T 表;

end

输出邻域选优结果 x^* ;

end

4.4 混合粒子群优化算法

具体的 HPT 混合算法流程如下:

begin

设定粒子数 n_p , 规定迭代次数 N_{max} , 随机产生 n_p 个初始解(调度方式) X ;

设置粒子当前的位置为个体极值位置 $pxbest$, 应用评价机制对粒子的个体极值进行评价,根据相对接近度值对解的性能进行排序,找到全局极值位置 $gxbest$;

while(迭代次数 $< N_{max}$) do

for $j = 1 : n_p$

第 j 个粒子位置 $X(j)$ 与 $gxbest$ 交叉得到 $X'_1(j)$;

$X'_1(j)$ 与 $pxbest(j)$ 交叉得到 $X''_1(j)$;

对 $X''_1(j)$ 进行变异操作得到 $X'''_1(j)$;

对 $X'''_1(j)$ 进行邻域选优搜索操作得到 $X_1(j)$;

应用评价机制对 $X_1(j)$ 和 $pxbest(j)$ 进行评价;如果

$D(X_1(j)) > D(pxbest(j))$, 则 $pxbest(j) = X_1(j)$;

end for

$X \leftarrow X_1$;

应用评价机制对粒子的个体极值进行评价,找到全局极值位置 $gxbest$;

end

最后输出全局极值位置 $gxbest$;

end

5 仿真结果

应用于 ns-2 的算法仿真实验中,信道容量设置为 500 kb/s,数据包的长度为 1 kbits。节点睡眠状态到唤醒状态之间的转换时间假定为 470 μ s,发送和接收分组的功率消耗分别为 81 mW 和 180 mW,在空闲状态的功率与接收状态近似。

为了说明 HPT 传感器网络 TDMA 调度的有效性和优越性,将其与标准 PSO、文献[7]和文献[8]提出的算法在网络规模不同(汇聚节点皆居于网络区域中心,与文献[7]中网络拓扑构建方式相同)的环境下进行了时隙利用率、任务完成占用时隙数以及网络能耗三个指标的性能比较。文献[7]将 GA 迭加到标准 PSO 算法之后(PSO+GA),以通过 GA 的遗传运算来解决标准 PSO 的早熟问题,获得了比标准 PSO 以及很多其他调度算法更好的性能;文献[8]应用 SA 对每次迭代每个粒子的邻域进行了选优操作(PSO+SA),搜索效果得到了一定的改善。标准 PSO、PSO+GA 运行参数与文献[7]中所列参数相同,PSO+SA 与文献[8]相同,HPT 的运行参数如表 1 所示。为了进行算法的公平比较,算法的总迭代次数都设为 600,所有的算法都工作在低功耗模式,当节点在所分配的时隙内无数据包发送时,关闭通信模块,进入睡眠状态。比较结果如表 2~表 4 所示。其中, α 为标准 PSO、PSO+GA 和 PSO+SA 算法解的评价机制中适值函数的权重因子。

表 1 算法运行参数

PSO 部分	TS 部分		
粒子总数	30	禁忌长度	5

表 2 算法的任务完成占用时隙数

	25	49	81	121	169
网络节点数	25	49	81	121	169
PSO ($\alpha=0$)	30	57	88	147	206
PSO+GA ($\alpha=0$)	28	55	86	144	198
PSO+SA ($\alpha=0$)	27	51	82	137	191
PSO ($\alpha=1$)	31	60	93	156	210
PSO+GA ($\alpha=1$)	30	58	91	151	203
PSO+SA ($\alpha=1$)	30	56	89	149	199
HPT	28	51	80	134	188

表 3 算法的时隙利用率 (%)

网络节点数	25	49	81	121	169
所有算法	100	100	100	100	100

表 4 算法的任务完成网络能耗 mJ

网络节点数	25	49	81	121	169
PSO($\alpha=0$)	38.01	106.1	205.2	415.2	659.4
PSO+GA($\alpha=0$)	37.67	105.1	204.4	418.2	650.9
PSO+SA($\alpha=0$)	36.73	104.7	202.1	416.8	646.2
PSO($\alpha=1$)	36.01	102.6	202.4	402.9	647.4
PSO+GA($\alpha=1$)	35.78	101.3	197.1	402.0	644.3
PSO+SA($\alpha=1$)	34.85	98.6	193.6	397.6	638.7
HPT	35.75	96.4	190.6	396.5	634.2

表 2 和表 3 反映了传感器网络调度算法的时间性能,表 4 则反映了调度算法的能耗性能。表 3 中的数据说明,无论网络规模多大,所有算法的时隙占用率都达到了 100%。这是因为算法在解码时都是根据需要来给予任务进行时隙分配的,每个时隙必定对应一个或多个子任务,时隙不会浪费,因此算法都比较适合于传感器网络有限时间内的数据收集。从表 2~表 4 可以看到,本文所提出的 HPT 算法的性能最优,标准 PSO 算法性能相对较差,而且随着传感器网络规模的扩大,这种性能的差距会越来越明显。标准 PSO 算法在搜索初期收敛速度很快,但在后期却易于陷入局部最优点,这是 PSO 算法的主要缺点。而 PSO+GA 算法在标准 PSO 算法后迭加了 GA,以解决 PSO 的缺陷,然而 GA 同样也存在着早熟问题,搜索能力的改善非常有限,甚至可能不会产生任何效果。SA 具有很强的本地搜索能力,将 SA 嵌入到 PSO 中能有效地改善 PSO 的早熟问题,提高网络的调度性能。但是,在 PSO+SA 中,每次迭代结束后,对每个粒子个体极值位置只是进行了非常有限和低效率的邻域搜索,对粒子个体极值位置的改善能力有限,因此算法对早熟问题的改善还有提高的空间。HPT 采用了本地搜索能力强、搜索效率高的 TS 对解进行择优操作,能够很好地解决 PSO 的缺陷。同时,HPT 也采用了 TOPSIS 评价机制,使多目标解的评价更加合理,对之后搜索起到了很好的引导作用。因此,HPT 的时间性能与能耗性能更优。

6 结 论

节能设计一直是无线传感器网络系统设计中的最重要的要求。本文首先说明了传感器网络高效的节点 MAC 休眠/唤醒调度机制对节能的作用,然后分析了基于时分复用的 MAC 协议相对于基于竞争的 MAC 协议在时延和节能上的优势,在此基础上,针对无线传感器网络周期性全局快速数据收集应用场合,提出了一种基于 PSO 和 TS 的混合算法,以对这类网络进行多指标 TDMA 优化调度,运用内嵌 TS 来增强 PSO 的搜索能力,改善 PSO 易于陷入局部最优的缺陷,获得了好的搜索寻优效果。在解的评价机制上,引入了基于熵权的 TOPSIS 评价机制,使多指标的评价更为合理,评价结果可信、有效,能为搜索提供可靠的依据,得到更为优化的搜索结果。与已经提出的一些无线传感器网络 TDMA 调度算法相比,本文所提出的算法数据收集效率

更高,能耗更小,调度更优。

然而,本文所提出的算法仍存在一些不可忽视的问题。当传感器网络规模较大时,算法计算需要的时间、存储空间等开销将非常大,而且算法的可扩展性较差,当网络动态变化剧烈时,就需要额外的机制(如文献[4]中的侦听选择)来增强算法的可扩展性。总之,基于 PSO 的无线传感器网络 TDMA 调度机制的研究处于初期,更为深入细致的工作还有待进一步展开。

参 考 文 献:

- [1] Li Shihan, Qian Depai, Liu Yi, et al. Adaptive distributed randomized TDMA scheduling for clustered wireless sensor networks[C]// *IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2007:2688-2691.
- [2] 林恺,赵海,尹震宇,等.无线传感器网络路由中的能量预测及算法实现[J].通信学报,2006,27(5):21-27.
- [3] Gandham S, Zhang Ying, Huang Qingfeng. Distributed minimal time convergecast scheduling in wireless sensor networks[C]// *26th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems*, 2006:50-58.
- [4] Havinga P J M, van Hoesel L F W. A lightweight medium access protocol (LMAC) for wireless sensor networks: reducing preamble transmissions and transceiver state switches [C] // *Proc. of the 1st International Conference on Networked Sensing Systems*, 2004.
- [5] 龚海刚,刘明,王晓敏. TLTS:大规模无线传感器网络下基于簇的两级 TDMA 调度协议[J].计算机研究与发展,2007,44(1):71-77.
- [6] Sinem Coleri Ergen, Pravin Varaiya. TDMA scheduling algorithms for sensor networks[R]. *Berkeley: Department of Electrical Engineering and Computer Sciences University of California*, 2005.
- [7] Mao Jianlin, Wu Zhiming, Wu Xing. A TDMA scheduling scheme for many-to-one communications in wireless sensor networks[J]. *Computer Communications*, 2007,30(4):863-872.
- [8] Wang Tao, Wu Zhiming, Mao Jianlin. PSO-based hybrid algorithm for multi-objective TDMA scheduling in wireless sensor networks[C]// *IEEE International Conference on Communications and Networking*, 2007:850-854.
- [9] Karp B, Kung H T. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks[C]// *Proc. of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2000.
- [10] 赵红梅,李科伟.基于改进的 TOPSIS 法在供应链中经销商的选择与评价方法研究[J].内蒙古农业大学学报,2007,28(2):180-186.
- [11] 高尚,杨静宇.武器-目标分配问题的粒子群优化算法[J].系统工程与电子技术,2005,27(7):1250-1252.(Gao Shang, Yang Jingyu. Solving weapon-target assignment problem by particle swarm optimization algorithm[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005,27(7):1250-1252.)