

WMSNs 中粒子群优化的多径流量分配路由算法

吴 笛, 董淑福, 王建峰, 郭 非

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

摘要 针对无线多媒体传感器网络(WMSNs)节点能耗问题,提出了一种基于粒子群优化的多路径自适应流量分配路由 MATDR-PSO 算法。通过建立能效优化模型,将最小能耗和能耗均衡 2 个特性转化为多目标优化问题;利用粒子群优化算法动态分配多路径上各条链路流量来实现网络的能效优化。仿真实验表明:MATDR-PSO 算法能够在降低全网节点消耗总能量的同时保证能耗的均衡特性,显著提高了网络的生命周期。

关键词 无线多媒体传感器网络;粒子群优化;流量分配;网络生命周期

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.01.016

中图分类号 TP393 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)01-0072-05

Multipath Adaptive Traffic Distributing Routing Based on PSO Algorithm in Wireless Multimedia Sensor Networks

WU Di, DONG Shu-fu, WANG Jianfeng, GUO Fei

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Considering at the energy consumption of node in wireless multimedia sensor networks, a multipath adaptive traffic distributing routing MATDR-PSO algorithm based on PSO is proposed. An energy-efficiency optimizing model is built which can translate the minimum of energy consumption and its equilibrium characteristic into multi-objective optimization problems; and link flow on multipath is dynamically distributed by particle swarm optimization algorithm to achieve energy-efficiency optimizing of the network. Simulation results show that the algorithm can reduce the total energy consumption of the whole network nodes and balance its distribution simultaneously, the life cycle of network is prolonged significantly.

Key words: wireless multimedia sensor networks; particle swarm optimization; traffic distribution; life cycle of network

由于多媒体传感节点感知信息丰富、信息处理复杂且部署后很难进行电能补充,因此,影响 WMSNs 实用化的一个最主要问题就是能耗问题^[1]。路由协议是 WMSNs (Wireless Multimedia Sensor Networks)的关键技术之一,其研究热点是如何高

效地利用有限的能量最大化网络生命周期,提高其能量效率。目前能量高效的路由协议主要包括 2 大类:最小能耗路由协议和能耗均衡路由协议^[2-3]。最小能耗路由协议通过建立能耗最低的路径来节省网络资源,但易导致路径上的关键节点频繁的收发

收稿日期: 2014-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61201209)

作者简介: 吴 笛(1989—)男,陕西汉中,人,硕士生,主要从事无线多媒体传感器网络传输控制协议研究.E-mail: wd258998040@vip.qq.com

引用格式: 吴笛,董淑福,王建峰,等. WMSNs 中粒子群优化的多径流量分配路由算法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(1):72-76. WU Di, DONG Shufu, WANG Jianfeng, et al. Multipath Adaptive Traffic Distributing Routing Based on PSO Algorithm in Wireless Multimedia Sensor Networks[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(1): 72-76.

数据而成为瓶颈节点;能耗均衡路由协议避开低能量节点,以全网整体能耗换取热点区域的个别消耗,使得能量的消耗均衡化,但无法保证全网的传输总能耗。因此传感器网络的路由协议设计必须兼顾最小能耗和能耗均衡两方面特性,否则将可能导致网络因资源利用不均或整个网络开销过大而提前死亡。

多路径路由相比单路径路由能够更好的兼顾这方面特性,一方面,使用多路径并行传输能使全网数据分布更加均匀,从而达到能耗均衡的效果。能量感知多路径(EAR)协议^[4]生成并且维护一组转发路径,每次根据路径代价概率性选择一条路径转发数据,但并没有真正意义上的利用多路径的优势;另一方面,在多路径上良好的流量分配与协调能使全网节点的总能耗达到最低。传统的多路径路由没有深入研究流量分配策略对网络能耗和负载均衡的影响,文献[5]根据路径的时延权重动态地给多条路径分配数据流量的比例,使得网络资源得到了充分利用,但并没有涉及节点能量;文献[6]提出了一种自适应能耗均衡路由协议,通过构造双层规划模型,周期性的调整各链路的流量分配以达到最大化网络寿命的目的;文献[7]结合自回归滑动平均模型对路径的流量进行预测,设定预测阈值,在主路径即将传输失败前切换至次优路径,从而实现多路径间的负载均衡。本文将最小能耗和能耗均衡转化为多目标优化问题,通过粒子群优化算法(PSO)^[8]进行求解,PSO算法针对流量分配特点可以动态了解各链路流量的变化情况且始终保持节点流量守恒原则,与实际情形相符。

1 能效优化模型

WMSN中节点需要采集大量的多媒体信息,其图像的采集、处理以及无线收发等能耗基本相当,呈“均匀”分布状态^[9]。在无线通信模型里,节点的能耗与流过该节点的数据量大小呈正比关系,本算法中利用多路径并行传输数据并通过协调各路径上节点的流量来实现能效优化的目的。将最小能耗特性转化为最大化网络剩余能量 E_{re} ,将能耗均衡特性转化为最小化剩余能量方差 σ_{re}^2 ,方差小说明瓶颈节点出现的概率越小,能耗均衡特性越好。本文以各链路分配的流量为自变量,以最大化网络剩余能量和最小化剩余能量方差为目标,建优化模型:

$$\max E_{re} = \sum_{i=1}^M E_{re}(i) = \sum_{i=1}^M (E_i - \sum_{j \in N_i} D(i,j)t(i,j) - \sum_{j \in N_i} R(j,i)g(j,i))$$

$$\min \sigma_{re}^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (E_{re}(i) - \overline{E_{re}})^2 =$$

$$\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [E_i - \sum_{j \in N_i} D(i,j)t(i,j) - \sum_{j \in N_i} R(j,i)g(j,i) - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (E_i - \sum_{j \in N_i} D(i,j)t(i,j) - \sum_{j \in N_i} R(j,i)g(j,i))]^2$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in N_i} D(i,j) = \sum_{j \in N_i} R(j,i) \quad (1)$$

$$E_i \geq \sum_{j \in N_i} D(i,j)t(i,j) + \sum_{j \in N_i} R(j,i)g(j,i) \quad (2)$$

式中: M 为总节点数; E_i 为节点 i 初始能量; N_i 为节点 i 的邻居集合; $D(i,j)$ 为节点 i 在链路 (i,j) 上发送的数据流量; $t(i,j)$ 为节点 i 在链路 (i,j) 上发送单位 bit 数据流量时所消耗的能量; $R(j,i)$ 为节点 i 在链路 (j,i) 上接收的数据流量; $g(j,i)$ 为节点 i 在链路 (j,i) 上接收单位 bit 数据流量时所消耗的能量。式(1)为节点间流量守恒,式(2)为节点接收、发送数据所消耗的能量不能高于节点的初始能量。

数据传输采用经典能耗模型^[10],节点 i 发送单位 bit 数据,传输能耗可用下列公式进行计算:

$$t(i,j) = \begin{cases} E_{elec} + \epsilon_{fs} d_{ij}^2 & d_{ij} \leq d_0 \\ E_{elec} + \epsilon_{mp} d_{ij}^4 & d_{ij} > d_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: d_{ij} 为节点 i,j 间的距离; E_{elec} 为无线发射线路收发单位数据所消耗的能量; ϵ_{fs} 、 ϵ_{mp} 分别为 2 种衰减模型功率放大所需的参数; d_0 为距离阈值,用来区分 2 种不同的能量衰减模型。而节点 i 接收单位 bit 数据,接收能耗 $g(j,i) = E_{elec}$ 。

2 粒子群优化算法

PSO算法源于对鸟群捕食行为的研究,通过鸟类的集体协作使群体达到最优,数学表示如下。

假设 M 个粒子组成的群体在 d 维的搜索空间以一定的速度飞行。粒子 i 在 t 时刻的位置为: $\mathbf{x}_i^t = [x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{id}^t]^T$, $x_{id}^t \in [L_d, U_d]$, L_d, U_d 分别为搜索空间的下限和上限;速度为: $\mathbf{v}_i^t = [v_{i1}^t, v_{i2}^t, \dots, v_{id}^t]^T$, $v_{id}^t \in [v_{\min,d}, v_{\max,d}]$ 。

个体最优位置: $\mathbf{p}_i^t = [p_{i1}^t, p_{i2}^t, \dots, p_{id}^t]^T$;全局最优位置: $\mathbf{P}_i^t = [P_{i1}^t, P_{i2}^t, \dots, P_{id}^t]^T$ 。

粒子在 $t+1$ 时刻的位置通过下式更新获得:

$$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (P_{id}^t - x_{id}^t) \quad (4)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (5)$$

式中: ω 为惯性权重,决定对当前速度继承的多少; c_1, c_2 为学习因子,反应粒子间的信息交流; r_1, r_2 为均匀分布在 $(0,1)$ 间的随机数。

3 模型求解

3.1 粒子表达式构造

实现 PSO 算法的关键问题之一在于找到一个合适的表达方式,使粒子与解相对应。本文中每个粒子的 d 维向量 X_i 表示路径流量分配的一个解,进行流量的多路径分配;每一维对应的就是路径链路 ij 上的流量。

PSO 算法在寻优的过程中,以适应度函数 fit_i 为依据来衡量每个粒子的好坏程度,因此适应度函数本身的优劣直接影响到 PSO 算法的收敛速度和可行性,设计适应度函数如下:

$$fit_i = c_1 \frac{E_{re\max} - E_{re}(i)}{E_{re\max}} + c_2 \frac{\sigma_{re}^2(i) - \sigma_{re\min}^2}{\sigma_{re\min}^2}$$

式中: $E_{re}(i)$ 和 $\sigma_{re}^2(i)$ 为粒子群中第 i 个粒子的网络总剩余能量和剩余能量方差, $E_{re\max}$ 和 $\sigma_{re\min}^2$ 分别代表利用最小能耗和能耗均衡路由算法计算出的相对应的极值, c_1 、 c_2 为权衡系数,为了使 fit_i 更加合理的体现最小能耗和能耗均衡 2 种特性,仿真中取 $c_1 = c_2 = 0.5$ 。从适应度函数 fit_i 可知,当 $E_{re}(i)$ 、 $\sigma_{re}^2(i)$ 越接近 $E_{re\max}$ 、 $\sigma_{re\min}^2$,粒子的适应度值越小,网络的能效优化性能越好。

3.2 算法实现过程

流量的分配过程中,必须要满足节点的流量守恒原则,即路径上各链路的流量不能随机选取,故在算法实现过程中要做出相应的修改,具体步骤如下:

步骤 1 初始化。

1) 初始化 PSO 算法中各类参数: L_d 、 U_d 、 c_1 、 c_2 、 v_{min} 、 v_{max} 、最大迭代次数 T 以及惯性权重 ω 。

2) 初始化粒子的位置向量 X_i 和速度向量 V_i : 设节点 i 接收的流量为 Q_i ,则粒子的位置向量 X_i 所对应的每维随机选取 $[0, Q_i]$ 之间的数,即:

$$D(i, j) = Q_i C_R \quad C_R \in [0, 1]$$

为满足模型约束条件中节点流量守恒原则,需按照式(6)对 $D(i, j)$ 进行归一化处理:

$$\overline{D(i, j)} = Q_i D(i, j) / \sum_{j \in N_i} D(i, j) \quad (6)$$

速度向量 V_i 随机选取 $[1 - Q_i, Q_i - 1]$ 之间的整数。其他节点所对应的 X_i 、 V_i 中每维数值的选取用上述方法同理可求。

3) 用适应度函数评价所有粒子,将初始化值作为当前每个粒子的个体最优值并找出全局最优值 P_i^t ,适应度值越小说明粒子越优秀。

步骤 2 粒子状态更新。

1) 用式(4)(5)对每个粒子的速度和位置更新。若 X_i 、 V_i 超过其取值范围,取其对应边界值。

2) 对更新后的位置向量 X_i 进行归一化处理,并用适应度函数评价粒子,如果优于该粒子当前的个体极值,则将新的 p_i^t 设置为该粒子的位置,且更新个体极值。如果所有粒子的个体极值中最好的优于当前全局最优值,则将新的 P_i^t 设置为该粒子的位置,且更新全局极值。

步骤 3 检验是否符合结束条件。

如果当前的迭代次数达到了预先设定的最大次数 T_{\max} ,或者最终结果小于设定的收敛精度 ξ ,则停止迭代,输出最优解 X ,否则转到步骤 2。

3.3 将粒子群算法引入流量分配的可行性分析

1) 粒子都表示流量分配的解。一个粒子中的每一维对应各条链路上的流量值,使得每个粒子对应的向量 X 都表示流量分配的一个解。

2) 节点流量守恒原则。通过对粒子中每一维数值的归一化处理,使得算法在每次迭代中都满足节点流量守恒原则,符合实际的网络流量分配情况。

3) 粒子群算法优化的过程具有方向性。表示流量分配解的粒子始终根据自身经验和群体经验调整各个链路的流量,向着最优化的方向靠近,而不是盲目的遍历整个可行域。

4 多路径自适应流量分配路由算法

假设传感器节点和基站静止不动,节点可通过自身 GPS 获取具体位置信息且无线发射功率一定, MATDR-PSO 算法可分为如下阶段。

4.1 初始化阶段

算法的初始化主要是完成最小跳数梯度场的建立,网络在初始状态时, sink 节点最小跳数值 $HC = 0$,其他节点 HC 值为无穷大,建立过程如下:

1) sink 节点在通讯半径范围内 flooding 信息查询分组,分组中的字段包括:节点 ID、节点距离 sink 节点的最小跳数 HC 值。

2) 相邻节点收到查询分组后,将分组中 HC 值加 1 并与自身存储的 HC 值比较,小于则用新值代替原存储值;将查询分组中的 HC 值换成新值、将节点 ID 换成本节点 ID,然后将更新的查询分组继续以 flooding 的方式转发。若大于自身存储的 HC 值,则丢弃查询分组不做任何处理。其他节点收到查询分组后也按照上述方法进行处理。

初始化阶段完成之后,网络中所有节点都确定了自己到 sink 节点的最小跳数。

4.2 数据传输阶段

数据传输阶段是本算法的核心阶段,主要完成多路径的统计和各路径流量的分配,具体过程如下:

1) 源节点发送路径发现消息 Discovery,信息中

包括节点 ID 和节点当前的剩余能量 E_{re} 。该信息以受控 flooding 的方式(受最小跳数值约束)向 sink 节点传送,即信息按照最小跳数梯度场,以每跳 HC 值减 1 为约束向 sink 节点方向传送。此过程中,收到信息的中间节点将自身的 ID 以及当前剩余能量 E_{re} 分别加入到 Discovery 信息中,并继续转发 Discovery 信息。Sink 节点根据 Discovery 信息中包含的各节点信息即可统计出源节点到 sink 节点的所有可用路径。

2) Sink 节点根据 Discovery 信息中各节点的剩余能量 E_{re} ,按照 3.2 节的模型求解步骤,得到所有可用路径上各链路的流量,将结果以信息形式沿原路径反向传送。这样,全网就可以根据各链路流量分配的比例,合理规划数据在多路径上的传输,来实现网络的能效优化。

5 仿真分析

MATDR-PSO 算法是通过控制流量在多路径上的分配,减少全网的总能耗和实现网络的负载均衡。EAR 算法通过在多条路径中按照某种概率随机选取一条路径进行数据传输的方式实现能效优化,概率的大小与路径代价大小有关。为说明并行多路径上良好的流量分配与协调对网络能效的影响,在 opnet 仿真平台上,从网络能耗特性、能耗均衡特性以及网络生命周期 3 个方面对 MATDR-PSO 和 EAR 进行仿真。根据节点有效通信半径,在 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的区域内,利用坐标数据随机生成 30 个多媒体节点和 1 个基站,基站坐标(0,0),见图 1,仿真前选定 1 个节点作为源节点向基站发送数据分组,最终实验曲线以传输数据量为横坐标,仿真参数如下:节点初始能量 5 J;节点通信半径 30 m;粒子个数 20; $c_1 = C_2 = 2$;最大迭代次数 1 000; $E_{elec} = 50\text{ nJ/bit}$; $\epsilon_{fs} = 10\text{ pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^2)$; $\epsilon_{mp} = 0.001\text{ 3 pJ}/(\text{bit} \cdot \text{m}^4)$ 。

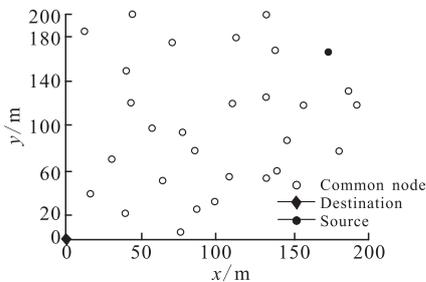


图 1 仿真实验节点位置分布

Fig.1 Node location distribution in simulation

5.1 网络能耗特性比较

图 2 反映了仿真 300 s 时 2 种路由算法的网络

消耗的总能量大小情况。观察可知,随着传输数据量的增大,MATDR-PSO 算法的数据传输总能耗始终小于 EAR 算法。由此可见,MATDR-PSO 算法通过对能效优化模型的求解,利用粒子群优化算法合理的分配各链路上的流量,在一定程度上降低了网络的总能耗,相比 EAR 算法以路径代价为准概率性的选择路径而言,能够更加准确有效的保证网络传输的总能耗。

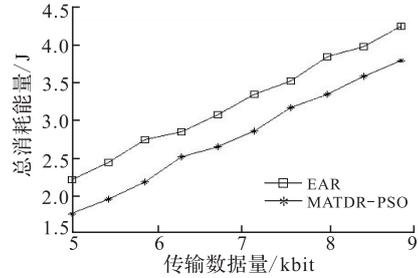


图 2 网络总消耗能量对比

Fig.2 Comparison of energy consumption of network

5.2 能耗均衡特性比较

图 3 反映 2 种路由算法剩余能量方差的变化。可以看出,随着数据量增大,MATDR-PSO 相比 EAR 算法剩余能量方差减小了大约 3 个数量级。

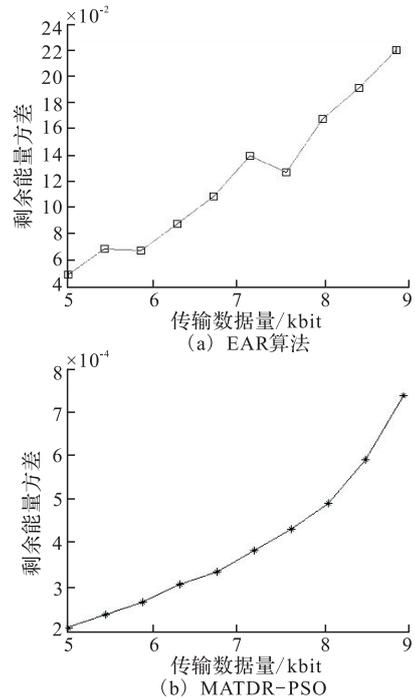


图 3 剩余能量方差

Fig.3 Remaining energy variance

为了更直观的反映剩余能量方差的变化对于节点剩余能量的影响,分别统计了 2 种路由算法下网络所有节点的剩余能量分布情况,见图 4,纵坐标表示剩余能量与初始能量的比值(剩能比),对比图 4 (a)、(b)可知,MATDR-PSO 路由算法在能耗均衡特性上明显优于 EAR 算法,EAR 算法仅仅依靠路

径代价概率性选择路径,在能耗均衡特性的保证上存在一定的随机性和不确定性,而 MATDR-PSO 通过对剩余能量方差的优化,利用精确的流量分配策略使得能耗分布更为均匀。

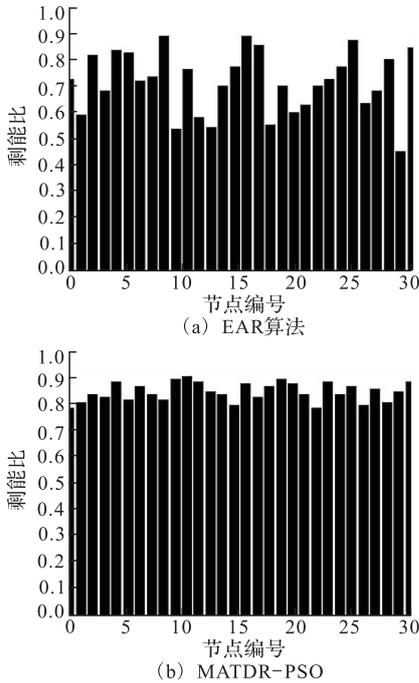


图 4 节点剩余能量对比

Fig.4 Comparison of remaining energy of node

5.3 网络生命周期比较

定义多媒体传感器网络的生命周期为从部署到出现网络第一个节点能量耗尽的时间。从图 5 中可以看出采用 MATDR-PSO 算法的网络生命周期比 EAR 算法提高了大约 20%,这说明 MATDR-PSO 算法利用粒子群优化各条链路流量不仅使得网络传输总能耗减少,并且能耗分布更为均匀,有效的避免了瓶颈节点的出现,延缓了网络中第一个节点的死亡时间,达到了延长网络生命周期的目的。

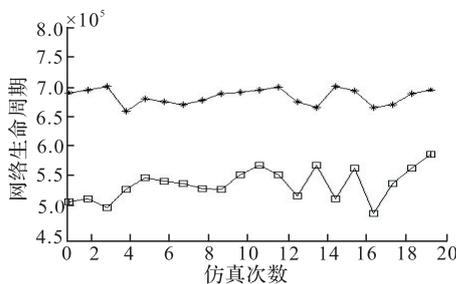


图 5 网络生命周期对比

Fig.5 Comparison of life cycle of network

6 结论

围绕无线多媒体传感器网络节点能耗问题,将粒子群优化算法应用于流量分配,设计了一种基于

粒子群优化的多路径自适应流量分配路由算法 MATDR-PSO;通过建立能效优化模型,将最小能耗和能耗均衡 2 个特性转化为多目标优化问题;利用粒子群优化算法动态分配多路径上各条链路流量来实现网络的能效优化。仿真实验表明,MATDR-PSO 算法能够在降低全网节点消耗总能量的同时保证能耗的均衡特性,显著提高了网络的生命周期。

参考文献(References):

[1] FAN Gaojuan. Multiple Description Coding Based Transmission Performance in Wireless Multimedia Sensor Networks[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012, 35(6): 70-73.

[2] Ben-Othman J, Yahya B. Energy Efficient and QoS Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2010, 70(8): 849-857.

[3] Kandris D, Tsagkaropoulos M, Politis I. Energy Efficient and Perceived QoS Aware Video Routing over Wireless Multimedia Sensor Networks[J]. Ad Hoc Networks, 2011, 9(4): 591-607.

[4] Shah R, Rabaey J. Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks[C]//Proc of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Orlando: IEEE press, 2002: 350-355.

[5] 安辉耀, 卢锡城, 彭伟. MANET 中基于动态拓扑的多路径自适应流量分配算法[J]. 通信学报, 2006, 27(7): 20-26.

AN Huiyao, LU Xicheng, PENG Wei. Adaptive Traffic Distributing Based on Dynamic Topology for Multipath Routing in MANET[J]. Journal on Communication, 2006, 27(7): 20-26. (in Chinese)

[6] 赵彤, 郭田德, 杨文国. 无线传感器网络能耗均衡路由模型及算法[J]. 软件学报, 2009, 20: 3023-3033

ZHAO Tong, GUO Tiande, YANG Wenguo. Energy Balancing Routing Model and Its Algorithm in Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Software, 2009, 20: 3023-3033. (in Chinese)

[7] 李捷, 刘先省, 韩志杰. 基于 ARMA 的无线传感器网络流量预测模型的研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(5): 1224-1227

LI Jie, LIU Xianxing, HAN Zhijie. Research on the ARMA-Based Traffic Prediction Algorithm for Wireless Sensor Network [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(5): 1224-1227. (in Chinese)

[8] Parsopoulos K E, Vrahatis M N. Recent Approaches to Global Optimization Problems Through Particle Swarm Optimization[J]. Natural Computing, 2002, 1(1): 235- 306.

[9] 周灵, 王建新. 无线多媒体传感器网络路由协议研究[J]. 电子学报, 2011, 39(1): 149-156.

ZHOU Ling, WANG Jianxin. Research on Routing Protocol in Wireless Multimedia Sensor Network[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1): 149-156. (in Chinese)

[10] Bandyopadhyay S, Coyle E J. An Energy Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks[C]//INFO-COM2003, the 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. IEEE, 2003: 1713-1723.

(编辑:姚树峰)