

长链型无线传感器网络 QoS 路由优化的研究*

张君艳, 朱永利, 李丽芬, 彭 伟

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 针对输电线路监测系统对无线传感器网络实时性和可靠性要求较高的特点,在抽象出的长链型传感器网络 QoS 路由模型中把网络带宽、时延、跳数、收包率作为链路约束,寻求网络中的最优数据传输路径。考虑到基本蚁群算法存在收敛速度慢、易陷入局部最优等缺陷,提出一种用自适应蚁群算法求解最优路径的方法。仿真结果表明,改进的算法通过自适应地调整信息素挥发因子,能够快速找到满足约束的最优路径,网络规模越大其优势越明显,保证了用于输电线路监测的无线传感器网络数据传输的服务质量。

关键词: 无线传感器网络; 自适应蚁群算法; 服务质量; 输电线路监测

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)07-2720-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.07.090

Research on QoS routing optimization for WSN with long-chain structure

ZHANG Jun-yan, ZHU Yong-li, LI Li-fen, PENG Wei

(School of Control & Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China)

Abstract: Recent developments in the field of transmission line monitoring system have led to a renewed interest in wireless sensor network which is characterized by the real-time and reliability. However, there is increasing concern that the basic ant colony algorithm are being disadvantaged because of the slow convergence and the issue of local optimality, so this paper focused on a new method of adaptive ant colony algorithm to solve the problem of optimal path which was verified by the simulation. In order to seek the optimal path for data transmission in wireless sensor network, considered the network bandwidth, delay, hop count and packet reception rate as link constraints in the abstract model of wireless sensor network with long-chain structure. The results show that the optimal QoS path can be quickly found via the adaptive control of the pheromone, at the same time, the quality of service for data transmission in wireless sensor network can be guaranteed.

Key words: wireless sensor network; adaptive ant colony algorithm; quality of service; transmission line monitoring system

0 引言

无线传感器网络在监控区域近似于线条型的智能交通、矿井环境监测、油气管道监测、铁路车轨监测、桥梁监测等,有着广阔的应用前景。基于无线传感器网络的输电线路在线监测技术是一门多学科高度交叉、知识高度集成的新兴技术^[1]。针对长链状输电线路空间跨度大的特点,大量设计好的传感器节点规则部署在野外高压输电线上后通过无线自组织的方式组建成网络。

无线传感器网络作为涵盖了数据感知、处理和传输的复杂任务型网络,其面向应用的特点给服务质量(QoS)的研究带来了许多新的挑战。无线传感器网络的基本应用类型包括事件驱动、时间驱动和查询驱动等多种复杂应用,不同的应用往往有不同的 QoS 需求^[2]。在基于无线传感器网络的输电线路监测系统中,通过传感器节点对输电线路上的关键参数(如绝缘子上电流)进行周期性采集,监测数据要求能够被可靠地传送到监控中心,因此要求链路的分组丢失率尽可能低;而且输电线路监测系统对传输数据的实时性要求较高,采用的无线传感

器网络为事件驱动型,因此对路径上的时间延迟大小非常敏感。如何合理有效地利用无线传感器网络资源,以获取更好的数据传输性能,为输电线路在线监测的服务质量提供保障,是长链型无线传感器网络 QoS 路由优化所要解决的问题。

蚁群算法(ant colony algorithm, ACA)是由意大利学者 Dorigo 等人^[3]于 20 世纪 90 年代初期提出的一种基于种群的全局启发式算法,它被广泛地用于求解各种 NP 难问题。Wang 等人^[4]证明至少包含两个约束条件的 QoS 路由问题是一个 NP 完全问题。文献[5]在证明蚁群算法求解无线传感器网络 QoS 路由问题可行性的基础上提出了一种用调和蚁群算法求解最优路径的方法,结果表明该算法大大减少了陷入局部最优解的可能性,但是调和蚁群算法运算代价较高,约束了其在无线传感器网络中的进一步应用。本文根据输电线路监测对无线传感器网络实时性和可靠性要求高的特点,提出了一种用自适应蚁群算法求解长链型无线传感器网络 QoS 路由问题的方法。该算法通过自适应调整信息素挥发因子,克服了易陷入局部最优解的缺陷,在求解大规模无线传感器网络 QoS 路由问题时,改进的算法明显地缩短了最优路径的搜索时间,提高了网络资源的利用率和路由的鲁棒性。

收稿日期: 2009-12-21; 修回日期: 2010-01-13 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60974125)

作者简介: 张君艳(1985-),女,河北衡水人,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络(kolazjy@yahoo.com.cn);朱永利(1963-),男,河北冀州人,教授,博导,主要研究方向为人工智能在电力系统中的应用;李丽芬(1970-),女,河北保定人,讲师,博士,主要研究方向为计算机网络;彭伟(1985-),男,河北衡水人,硕士研究生,主要研究方向为网络控制系统。

1 长链型无线传感器网络 QoS 路由问题的形式化描述

针对输电线路监测系统对数据传输的实时性和可靠性要求高的特点,无线传感器网络在以深度多跳的方式从源节点到汇聚节点传送数据的过程中,把网络带宽、时延、跳数、链路质量度量——收包率等参数作为传输路径上的 QoS 约束 C ,找到多约束最优传输路径。在抽象出的长链型 QoS 路由模型中,无线传感器网络被抽象为无向赋权图 $G(V, E)$ 。其中: V 为顶点集, E 是图的边的集合。将每条路径赋予相应的 QoS 度量参数,参数的操作包括最小性、可乘性和可加性^[6]。长链型无线传感器网络 QoS 路由问题是从图 G 中寻找满足 QoS 约束 C 并且从源节点 S 到目的节点 D 的可行路径 $P = S \rightarrow \dots \rightarrow e_{ij} \rightarrow \dots \rightarrow D$ 中消耗的网络资源最少的路径。

在长链型无线传感器网络 QoS 路由优化的研究中设定路径的 QoS 度量参数为

a) 带宽

$$\text{bandWidth}(P) = \min \{ \text{bandWidth}(e), e \in E(P) \}$$

b) 时延

$$\text{delay}(P) = \sum \text{delay}(e)$$

c) 跳数

$$\text{hop}(P) = \sum \text{hop}(e)$$

$$\text{hop}(e) = \begin{cases} 1 & e \in P \\ 0 & e \notin P \end{cases}$$

d) 链路收包率 (packet reception rate, PRR)

$$\text{PRR}(P) = \pi \text{PRR}(e)$$

其中: $\text{PRR} = L_r/L_s$ 。 L_r 为成功接收到的数据包个数, L_s 为链路发送的总数据包数。

e) 网络资源消耗函数

$$\text{resource}(P) = \frac{\text{delay}(P) \times \text{hop}(P)}{\text{bandWidth}(P) \times \text{PRR}(P)}$$

根据长链型无线传感器网络的特点, QoS 路由优化的目标是选择满足如下条件且使得资源消耗最小的路径 P :

a) $\text{bandWidth}(P) \geq B$;

b) $\text{delay}(P) \leq D$;

c) $\text{PRR}(P) \geq R$;

d) 以上三个条件均满足后使得 $\text{resource}(P)$ 最小。

上述条件表示在满足超过最小带宽,小于允许的最大时延以及大于最低数据包接收成功率的 QoS 约束下,寻求资源消耗最小的路径。其中: B 为带宽约束; D 为时延约束; R 为链路包接收成功率约束; $\text{resource}(P)$ 为消耗的无线传感器网络资源。长链型无线传感器网络 QoS 路由优化时设置每条链路由 (bandWidth, delay, PRR) 表示,得到的最优 QoS 路由由满足约束条件且网络资源消耗最小,即选出的路径具有最小的时间延迟和最高的数据包接收成功率,从而满足了输电线路监测系统对无线传感器网络实时性和可靠性的要求。

本文抽象出的用于输电线路监测的长链型^[7]无线传感器网络 QoS 路由模型如图 1 所示。其中链路的带宽由系统随机产生,分布在 1 ~ 10 bps,带宽的约束条件 B 设为 3 bps;链路的时延大小由系统随机产生,分布在 1 ~ 5 ms,时延约束条件 D 设为 20 ms;链路质量约束条件 PRR 设为 50%。

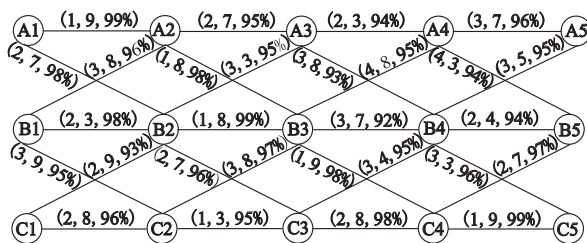


图1 用于输电线路监测的无线传感器QoS模型

2 基本蚁群算法

蚁群算法是通过模拟自然界中蚂蚁集体寻径的行为而提出的一种启发式随机搜索算法^[8]。通过候选解组成群体来寻求最优解的进化过程包含适应和协作两个基本阶段。在适应阶段,各候选解根据积累的信息不断调整自身结构;在协作阶段,候选解之间通过信息交流期望产生性能更好的解,最终信息素浓度最高的路径即为最优解。蚁群算法采用随机搜索策略且初期信息素匮乏,存在求解过程容易陷入局部最优解的缺陷;算法利用正反馈机制来强化性能较好的解,导致当前没有被选取的路径在以后路径选择过程中被选用的概率越来越小,使求得的解在某些局部最优解附近徘徊而出现停滞现象^[9]。

在早期网络中采用蚁群算法的蚂蚁寻路机制解决了包含三个约束条件 QoS 路由问题,其基本思想可简述如下:初始化网络 QoS 度量参数后删除不满足带宽条件的链路,得到简化的网络;然后从源节点释放蚂蚁,根据目标节点信息素表初始信息素分布选择路径;当蚂蚁到达目的节点时,对网络中的所有链路上的信息素浓度进行调整,并沿原路返回到源节点。在源节点继续释放下一只蚂蚁进行路径搜索,直至蚂蚁数达到 M 时算法结束。基本蚁群算法中任何一个节点要获得到达目的节点的最优路径,必须经过源节点的许多轮的蚂蚁发送,因此需要比较长的搜索时间。当网络规模较大时,算法性能急剧下降。

3 求解长链型无线传感器网络 QoS 路由优化的自适应蚁群算法

鉴于以上基本蚁群算法在求解 QoS 路由问题时的缺陷,本文在抽象出的用于输电线路监测的无线传感器网络 QoS 路由模型的基础上,采用自适应蚁群算法求解长链型无线传感器网络的最优 QoS 路径。

3.1 自适应蚁群算法

蚁群算法中的信息素挥发因子 ρ 的大小直接关系到蚁群算法的全局搜索能力与收敛速度。自适应蚁群算法通过动态更新信息素挥发因子,可以有效地避免算法陷入局部最优的可能和停滞现象的出现,并且在保证收敛速度的前提下提高了解的全局性。在蚁群算法中若信息素挥发因子 ρ 较大,当解的信息素浓度增加时以前搜索的解被选择的可能性非常大,影响算法的全局搜索能力;虽然减小 ρ 的值可以在一定程度上提高算法的全局搜索能力,但会降低算法的收敛速度。本文根据自适应蚁群算法的基本思想采用动态更新信息素因子 ρ 的值,避免由于挥发因子过大或过小影响算法的全局搜索能力及收敛速度。首先给 ρ 一个初始值 $\rho(t_0)$,当算法求得的最优解在 N

(N 为常数) 次循环内没有明显改进时, 则认为最优解疑似陷入局部极小值, ρ 采用式(1)进行自适应调整。

$$\rho(t) = \begin{cases} \mu \cdot \rho(t-1) & \text{若 } \mu \cdot \rho(t-1) \geq \rho_{\min} \\ \rho_{\min} & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

其中: μ 为挥发约束系数, $0 < \mu < 1$; ρ_{\min} 为最小值, 可以防止 ρ 过小降低算法的收敛速度。

自适应蚁群算法通过动态更新信息素因子可以使求得最优解的全局性有所提高, 且在求解大规模复杂问题时也能快速准确地找到全局最优解, 节省路径搜索时间, 因此在求解长链型无线传感器网络 QoS 路由问题时, 改进的蚁群算法是一种有效的求解方法。

3.2 基于自适应蚁群算法的 QoS 路由优化

自适应蚁群算法去掉了基本蚁群算法信息素的局部更新, 按照当次迭代最优解进行信息素的全局更新, 从而提高了算法的收敛速度。

自适应蚁群算法进行 QoS 路由优化的步骤如下:

a) 初始化网络拓扑并进行简化。在图 1 的 QoS 路由模型基础上将无线传感器网络中不满足带宽、时延、分组发送成功率等 QoS 约束的链路从网络拓扑中删除, 只剩下满足 QoS 约束的链路, 得到精简后的网络拓扑结构图, 如图 2 所示。

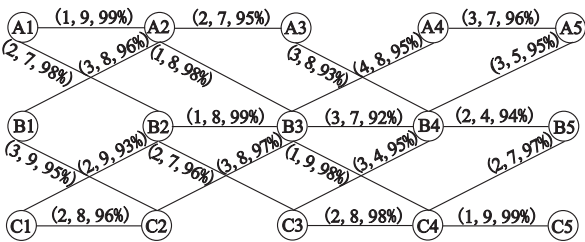


图 2 简化后的网络拓扑结构图

b) 初始化参数及禁忌表 $tabu_k$ 。假定网络中有 N 个传感器节点, M 只蚂蚁置于源节点并为每只蚂蚁生成禁忌表, 将源节点放入禁忌表。循环次数为 NC_{\max} , 初始化 α 、 β 等值并给出每条存在链路 bandwidth、delay、PRR 的值以及约束条件的 B 、 D 、 R 的值。每条边 e_{ij} 的信息素浓度 τ_{ij} 初始值设置为 10, NC 为当前循环次数, 初始值设置为 0。

c) 无线传感器网络 QoS 路由选择。在每个路径搜索循环内, 每只蚂蚁分别根据路径的选择概率选取一条从源节点到目的节点的路径, 当所有蚂蚁都完成了一次路径搜索后即完成一个循环周期。在搜索过程中, 蚂蚁根据各条路径上的信息素值及路径的启发信息来计算转移概率。蚂蚁 k 从节点 i 到 j 的路径选择概率公式为

$$P_{ij}(k) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(k)]^\alpha [\eta_{ij}(k)]^\beta}{\sum_{u \in L} [\tau_{iu}(k)]^\alpha [\eta_{iu}(k)]^\beta} & \text{若 } j \in L \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $L = \{C - tabu_k\}$ 表示蚂蚁 k 下一步允许访问的节点集合, 信息启发式因子 α 表示轨迹的相对重要性 ($0 < \alpha < 5$); 期望启发式因子 β 表示能见度的相对重要性 ($0 < \beta < 5$); $\eta_{ij}(k)$ 为节点 i 向节点 j 转移的启发函数, 其表达式为

$$\eta_{ij}(k) = \frac{1}{\text{resource}(p)} \quad (3)$$

d) 蚂蚁 k 从节点 i 转移到节点 j 后, e_{ij} 边上的信息素按照式(4)进行局部更新, 并将节点加入到禁忌表 $tabu_k$ 中直至所

有蚂蚁都完成一次路径搜索。

$$\tau_{ij} = (1 - \xi)\tau_{ij} + \xi\tau_0 \quad (4)$$

其中: τ_0 为常数, ξ 为可调参数且 $0 < \xi < 1$ 。采用 MMAS 算法中的方法对信息素进行限制, 即若 $\tau_{ij} > \tau_{\max}$, 则令 $\tau_{ij} = \tau_{\max}$; 若 $\tau_{ij} < \tau_{\min}$, 则令 $\tau_{ij} = \tau_{\min}$ 。

e) 重复执行步骤 c) 和 d), 求出并保存本次循环的最优解。若得到的最优值在 N 次循环中没有明显改进时, 则按照式(5)对信息素因子 ρ 进行更新, 否则直接进入下一步进行信息素的全局更新。

$$\rho(t) = \begin{cases} 0.95\rho(t-1) & \text{若 } 0.95\rho(t-1) \geq \rho_{\min} \\ \rho_{\min} & \text{否则} \end{cases} \quad (5)$$

f) 路径信息素全局更新规则。当所有蚂蚁完成一次循环后, 对各边上的信息素按式(6)进行全局更新得出最优解。其表达式为

$$\tau_{ij}(t+n) = (1 - \rho(t)) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (6)$$

其中: $\Delta\tau_{ij}(t)$ 表示蚂蚁 k 在本次循环中的信息素增量, 根据 Dorigo 给出的蚁周模型中

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{\text{resource}(P)} & \text{循环中经过节点 } i, j \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (7)$$

其中: Q 表示信息素强度的一个常数, 它在一定程度上影响算法的收敛速度; $\text{resource}(P)$ 为蚂蚁在本次循环中的总网络资源消耗。

g) 算法结束条件判断。本文中当算法的循环次数小于最大循环次数 NC_{\max} 时, 清空禁忌表 $tabu_k$, $NC = NC + 1$ 并返回步骤 c); 若算法的循环次数大于最大循环次数 NC_{\max} 时, 跳出程序循环并输出最优 QoS 路径。

综上所述, 长链型无线传感器网络 QoS 路由优化问题的自适应蚁群算法的求解过程总结为如图 3 所示的流程图。

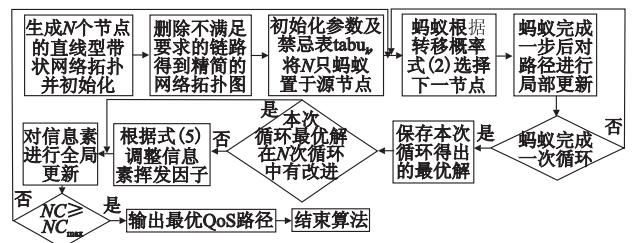


图 3 自适应蚁群算法流程图

4 仿真实验与结果分析

4.1 仿真实验

本文研究用于输电线路监测的无线传感器网络多约束 QoS 路由问题, 用仿真软件 MATLAB 7.6 作为仿真平台, 仿真实验时采用如图 1 所示的网络拓扑结构图, 其中链路的带宽、时延、收包率的值由系统随机产生。根据 QoS 路由算法删除不满足约束的链路后得到的拓扑图如图 2 所示。通过反复试验得出自适应蚁群算法中的参数设置为: $\alpha = 1$, $\beta = 2$, $\xi = 0.1$, $\tau_{\min} = 0.1$, $\tau_{\max} = 30$, $\rho_{\min} = 0.3$, $Q = 1\ 000$, $\rho(t_0) = 1$, 初始链路的信息素 $\tau = 10$, 蚂蚁的数量为 $M = 15$, 设置迭代次数 $NC_{\max} = 100$ 。设置好算法的参数后运行编写的自适应蚁群算法, 求解无线传感器网络最优 QoS 路径的程序, 最终求解出一条满足多约束 QoS 路由要求的最优路径。

4.2 实验结果分析

通过分别进行以下两组实验,分析比较自适应蚁群算法在求解无线传感器网络 QoS 路由优化问题上的优势。

实验 1 该实验中无线传感器网络采用如图 1 所示的长链式拓扑结构,网络中含有相同的节点数,通过分别多次运行基本蚁群算法和自适应蚁群算法求解最优 QoS 路径的程序,得出两算法求得最优解时迭代次数的比较图,如图 4 所示。其中基本蚁群算法需要大概迭代 70 次才能得出最优解,而自适应蚁群算法仅需迭代 30 次左右即能求得最优路径,且每次所需迭代次数波动较为平缓。在同等大小的网络规模中改进后的蚁群算法大大地节省了最优路径的搜索时间,得出的最优路径需要消耗的网络资源较少,从而保证在传输数据的过程中,网络时延小且数据包接收的成功率较高。实验验证了该算法在长链型无线传感器网络 QoS 路由优化的过程中是高效的,得出的最优 QoS 路径满足了输电线路监测系统实时性和可靠性的要求。

实验 2 在实验 1 的基础上,通过逐渐增加传感器节点的个数来改变无线传感器网络规模的大小,在扩展后的网络拓扑结构中采用基本的蚁群算法和自适应蚁群算法分别求解满足 QoS 约束的最优路径。在规模大小不同的传感器网络中分别运行两算法求解最优路径,得出如图 5 所示的算法运行时间与传感器节点个数的关系图,即当传感器节点个数较少时,自适应蚁群算法求解效率略优于基本蚁群算法;随着传感器节点个数的增加,改进的蚁群算法运行效率明显优于基本蚁群算法。实验证明,自适应蚁群算法在无线传感器网络规模较大的情况下仍然能快速准确地找到满足约束的最优 QoS 路径,缩短了数据传输路径的寻优时间,搜索最优解的能力较强。该算法对长链型无线传感器网络 QoS 路由优化时具有明显的优势,能够满足输电线路监测对无线传感器网络服务质量的要求。

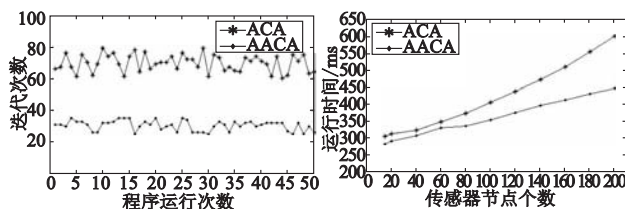


图4 两算法得到最优解迭代次数比较

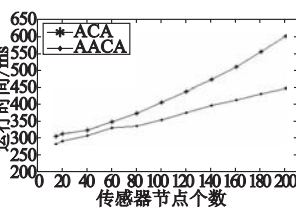


图5 节点个数与算法运行时间的关系

根据以上实验结果可知,在长链型无线传感器网络多约

束 QoS 路由优化的过程中,本文采用自适应蚁群算法与基本蚁群算法相比,具有较高的路径寻优效率,减少了路径搜索过程中陷入局部最优的可能性。当无线传感器网络规模很大时,该算法也能高效地得出最优解,且求得的最优数据传输路径能够满足跳数少、时延小及收包率高等网络服务质量的要求。

5 结束语

本文以输电线路监测为应用背景,针对系统对无线传感器网络实时性和可靠性要求较高的特点,抽象出长链型无线传感器网络 QoS 路由模型,采用自适应蚁群算法来求解满足网络带宽、时延和包成功到达率等约束的最优路径。通过仿真实验表明,改进后的算法通过自适应地调整信息挥发因子能够快速准确地找到满足 QoS 约束的最优路径,有效地解决了长链型无线传感器网络 QoS 路由优化问题,因此该算法在大规模无线传感器网络的实际应用中较基本蚁群算法具有显著的优势。

参考文献:

- [1] 黄新波. 输电线路在线监测与故障诊断[M]. 北京:中国电力出版社, 2008.
- [2] MOSTOFI Y, MURRAY R. New design principles for estimation over fading channels in mobile sensor networks[C]//Proc of the 44th Conference on Automatic Control. 2005.
- [3] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant system: optimization by a colony cooperating agents[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics Part B: Cybernetics, 1996, 26(1):2941.
- [4] WANG Zheng, CROWCROFT J. Quality of service routing for supporting multimedia applications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(7):1228-1234.
- [5] 肖伟,全惠云,刘枫. 基于蚁群算法的多路径多约束 QoS 路由研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(30):111-113.
- [6] CHEN Shi-gang. Routing support for providing guaranteed end-to-end quality-of-service[D]. Illinois: University of Illinois, 1999.
- [7] 刘海涛,张宝贤,高雪,等. 基于监测可靠度的直线型带状无线传感器网络部署方法: 中国, 200810061195. 5 [P]. 2008-11-12. www.cnpatentinfo.com/ipc/dtx/H04Q_detail_200810061195.html.
- [8] 李士勇,陈永强,李研. 蚁群算法及其应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [9] STUTZLE T, HOOS H H. Max-min ant system[J]. Future Generation Computer Systems, 2000, 16(19):889-914.

(上接第 2719 页)

- [2] 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, 2005:58-61.
- [3] WANG Ying, LI Tong, XIONG Mu-di. Performance analysis of CSMA with preamble sampling for multi-hop wireless sensor networks[C]//Proc of the, 2006 6th International Conference on ITS Telecommunications. 2006:921-924.
- [4] SHAFIULLAH G M, THOMPSON A, WOLFS P J. Energy-efficient TDMA MAC protocol for wireless sensor networks applications[C]//Proc of International Workshop on Internet and Distributed Computing Systems. 2008: 85-90.
- [5] 张晔,何晨,蒋铃鸽. 无线传感器网络中的 S-MAC 协议性能[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(7):1023-1026.
- [6] 王丽侠,赵磊,徐家品. WSN 中 S-MAC 协议的能量消耗分析及改进[J]. 微计算机信息, 2008, 24(5):281-283.

- [7] VAN DAM T, LANGENDOEN K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]// Proc of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM press, 2003:171-180.
- [8] LU G, KRISHNAMACHARI B, RAGHAVENDRA C. An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in sensor networks[C]// Proc of the 4th International Workshop on Algorithms for Wireless Mobile, Ad hoc and Sensor Networks. 2004:224-231.
- [9] HOU Bi-chong, ZHU Gang. An improved MAC protocol for wireless sensor networks[C]// Proc of 1st International Conference on Innovative Computing, Information and Control. Washington DC: IEEE Computer Society, 2006:76-79.
- [10] RAJENDRAN V, OBRACZKA K. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks[J]. Wireless Networks, 2006, 12(1):63-78.