

基于改进支持向量机的无线传感器网络路由优化算法

韩叶飞 白光伟 张功萱

(南京理工大学计算机科学与工程学院 南京 210094)

摘 要 为了解决当前无线传感器网络路由算法能耗大的缺陷,设计了基于改进支持向量机的无线传感器网络路由算法(PSO-LSSVM)。首先建立了无线传感器网络路由能耗的数学模型,然后通过组合模型的节点剩余能量进行在线估计,选择能耗最小的路由进行数据传输,最后在 Matlab 平台上对该算法的性能进行测试。结果表明,PSO-LSSVM 可以快速找到能耗最小的路由,改善了数据传输的可靠性,降低了数据的传输时延,而且综合性能优于对比的无线传感器网络路由算法。

关键词 自组织网络,组合模型,能量消耗,传输时延,数据传输

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.08.023

Routing Optimization Algorithm of Wireless Sensor Network Based on Improved SVM

HAN Ye-fei BAI Guang-wei ZHANG Gong-xuan

(Department of Computer Science & Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract In order to solve defects of large energy consumption in the current wireless sensor network routing algorithms, a novel wireless sensor network routing algorithm based on improved SVM(PSO-LSSVM) was designed. Firstly, a mathematical model of the routing energy consumption for wireless sensor network is established. Secondly, the residual energy of nodes of the combination model is used to perform on-line estimation. The route with minimum energy consumption is selected for data transfer. At last, the performance of this algorithm is tested on Matlab platform. The results show that the proposed algorithm can improve the reliability of data transmission and reduce the average delay of data transmission, and the over all performance is better than other wireless sensor network routing algorithms.

Keywords Ad-hoc network, Combination model, Energy consumption, Transmission delay, Data transfer

1 引言

随着无线网络的迅速发展,网络技术不断成熟。无线传感器网络与固定的基础设施无关,结构灵活,且不需要控制中心,能通过节点之间的相互协作实现信息的传输,在军事、救灾、医疗等领域具有重要的应用价值^[1-3]。无线传感器网络的拓扑结构具有时变性,使得传统网络路由算法无法适用于其数据传输,因此设计性能优异的路由算法是无线传感器网络研究中的重点^[4-5]。

当前无线传感器网络路由算法很多,优化链路状态路由(Optimized Link State Routing, OLSR)算法是最为经典的无线传感器网络路由算法,其通过多点中继节点实现信息路由,降低消息泛洪带来的开销。由于多点中继节点需要不断与其他节点进行信息交换,节点负载重,能量消耗大,因此该算法无法快速适应无线传感器网络拓扑结构的变化,从而使整个网络的性能降低^[6]。针对 OLSR 算法存在的局限性,许多学者对其进行了针对性改进^[7-9],如基于能量感知的 OLSR 算法,其选择能量消耗最低的路由进行数据传输,但易选择一些剩余能量较小的节点进行数据路由,使得整个无线传感器网

络的寿命变短;基于路径最短和能耗最小的 OLSR 算法,其数据传输的速度加快,但主干网络节点的负载加重,影响了网络的整体性能。节点剩余能量是能量感知的关键,为此有学者提出了基于能量预测的 OLSR 算法,如基于马尔科夫链预测节点剩余能量的 OLSR 算法,但其建模过程复杂,工作效率低,实际应用的局限性明显^[11-12]。最小二乘支持向量机(Least Square Support Vector Machine, LSSVM)将二次规划求解变为线性方程求解,缩短了训练时间,加快了建模速度,可以用于无线传感器网络的节点剩余能量预测^[13]。

为了减少数据传输的时延,均衡了节点间的能量消耗,设计了基于改进支持向量机的无线传感器网络路由算法。该算法综合利用粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法和 LSSVM 的优点,对节点剩余能量进行在线预测,选择能耗小的路由进行数据传输。本文通过仿真实验验证了其有效性。

2 LSSVM 和 PSO 算法

2.1 LSSVM

设数据集为 $D = \{(x_k, y_k) | k = 1, 2, \dots, N\}$, 其中 $x_k \in R^n$

到稿日期:2018-01-02 返修日期:2018-03-28 本文受国家自然科学基金项目(61073197)资助。

韩叶飞(1978—),男,博士生,讲师,主要研究方向为无线传感器网络、移动网络;白光伟(1961—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机网络, E-mail: njjusthyf@163.com(通信作者);张功萱(1961—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为分布式系统、可信计算。

和 $y_k \in R$ 分别表示样本的输入和输出,那么 LSSVM 最优决策问题可以表示为:

$$\min_{w,b,e} \phi(a,b,e) = \frac{1}{2} w^T w + \frac{1}{2} \gamma \sum_{k=1}^N e_k^2 \quad (1)$$

其中, γ 表示正则化参数,相应约束条件为:

$$y_k [w^T \varphi(x_k) + b] = 1 - e_k, k=1, \dots, N \quad (2)$$

引入拉格朗日乘子法对式(2)的二次规划问题进行求解:

$$L(w,b,e,\alpha) = \phi(w,b,e) - \alpha_k \sum_{k=1}^N \{ \alpha_k y_k [w^T \varphi(x_k) + b] - 1 + e_k \} \quad (3)$$

其中, α_k 表示拉格朗日乘子, $\alpha_k \in R$ 。

令 w, b, e_k, α_k 的偏导数为 0, 即有:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w} = 0 \rightarrow w = \sum_{k=1}^N \alpha_k y_k \varphi(x_k) \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{k=1}^N \alpha_k y_k = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial e_k} = 0 \rightarrow \alpha_k = \gamma e_k \\ \frac{\partial L}{\partial \alpha_k} = 0 \rightarrow y_k [w^T \varphi(x_k) + b] - 1 + e_k = 0 \end{cases} \quad (4)$$

对式(3)的优化可以变为对式(5)的求解:

$$\begin{bmatrix} 0 & -Y^T \\ Y & ZZ^T + \gamma^{-1} I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $Z = [\varphi(x_1)^T y_1, \varphi(x_2)^T y_2, \dots, \varphi(x_N)^T y_N]^T$, $Y = [y_1, y_2, \dots, y_N]$, $I = [1, 1, \dots, 1]^T$, $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N]$ 。

根据 Mercer 条件可以得到:

$$\Omega_{kl} = y_k y_l \phi(x_k) \phi(x_l) = y_k y_l \Psi(x_k, x_l) \quad (6)$$

LSSVM 的最优决策函数为:

$$y(x) = \text{sgn} \left[\sum_{k=1}^N \alpha_k y_k \Psi(x_k, x_l) + b \right] \quad (7)$$

选择 RBF 函数作为核函数 $\Psi(\cdot, \cdot)$, 其定义如下:

$$\phi(x_k, x_l) = \exp \left| -\frac{\|x_k - x_l\|^2}{2\sigma^2} \right| \quad (8)$$

其中, σ 表示核宽度参数。

2.2 PSO 算法

Kennedy 根据鸟群飞行觅食行为提出了 PSO^[14] 算法, 该算法通过粒子间的合作与竞争对问题进行求解, 收敛速度快、搜索能力强、易与其他算法结合。设包含 m 个粒子的种群为 $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$, 第 i 个粒子的位置和飞行速度分别为 $x_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n})^T$ 和 $v_i = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,n})^T$, 个体和群体的历史最好位置分别为 $p_i = (p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,n})^T$ 和 $p_g = (p_{g,1}, p_{g,2}, \dots, p_{g,n})^T$, $v_{i,d}^k$ 和 $x_{i,d}^k$ 表示第 k 次迭代中的速度和位置, 那么第 $k+1$ 次迭代的粒子速度与位置的更新方式为:

$$v_{i,d}^{k+1} = \omega v_{i,d}^k + c_1 \text{rand}() (p_{i,d}^k - x_{i,d}^k) + c_2 \text{rand}() (p_{g,d}^k - x_{i,d}^k) \quad (9)$$

$$x_{i,d}^{k+1} = x_{i,d}^k + v_{i,d}^{k+1} \quad (10)$$

其中, c_1 和 c_2 表示加速常数; $\text{rand}()$ 为随机数; $p_{i,d}^k$ 和 $p_{g,d}^k$ 分别表示个体和群体的第 d 维最优位置; ω 表示权重因子。

LSSVM 建模的过程中, 需要对参数 (σ, γ) 进行优化, 相对于支持向量机, 其待优化参数减少, 加快了建模速度。为此采

用 PSO 算法进行优化, PSO-LSSVM 的工作流程如图 1 所示。

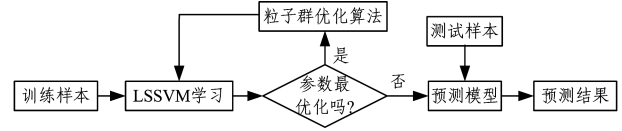


图 1 PSO-LSSVM 的工作流

Fig. 1 Work flow of PSO-LSSVM

3 基于改进支持向量机的无线传感器网络路由算法

3.1 目标函数

无线传感器网络进行数据路由时, 在运行初期选择传输功耗最小的路径进行数据传输, 以减少通信开销; 在运行后期, 节点之间的剩余能量差异大, 选择剩余能量高的节点进行数据传输, 以达到均衡能耗、延长网络寿命的目标。因此数据路由选择的目标函数 $W_R(t)$ 被定义为:

$$W_R(t) = \sum_{i \in R} W_{R,i}(t) \quad (11)$$

$$W_{R,i}(t) = P_{t,i} + K_1 (E_{full,i} - R_i(t)) / E_{full,i} + K_2 (E_{full,i} - R_i(t)) / E_{max} \quad (12)$$

其中, R 表示一条数据传输的路径, t 表示运行时间; $W_{R,i}(t)$ 表示 R 上节点 i 的目标函数值, $P_{t,i}$ 表示传输功耗, 即传输单位长度数据的能耗; K_1 和 K_2 是比例系数; $E_{full,i}$ 代表节点 i 的初始能量; $R_i(t)$ 表示 t 时刻节点 i 的预计剩余能量; E_{max} 表示最大初始能量。

由式(12)可知, 目标函数包括传输功耗和剩余能量。在运行初期, 节点之间的剩余能量相似, 路由选择主要与传输功耗相关; 在运行后期, 节点之间的剩余能量差异性大, 其主要与路由选择相关, 且受到多种因素作用, 使得节点能量消耗有时变性的特点。因此采用 LSSVM 对能量消耗进行估计, 从而实时得到节点的剩余能量。

3.2 PSO-LSSVM 的无线传感器网络路由算法

针对当前 OLSR 算法存在的局限性, 采用 LSSVM 对节点剩余能量进行实时估计, 并采用 PSO 算法对 LSSVM 的参数进行在线选择。基于 PSO-LSSVM 的无线传感器网络路由算法的工作机制如图 2 所示。

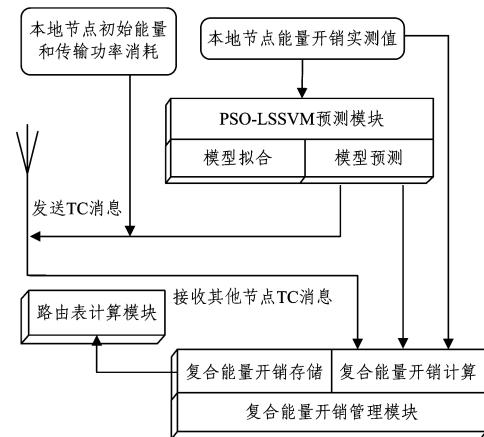


图 2 基于 PSO-LSSVM 的无线传感器网络路由算法的原理

Fig. 2 Work principle of wireless sensor network routing algorithm based on PSO-LSSVM

基于 PSO-LSSVM 的无线传感器网络路由算法的工作步骤如下:

Step1 无线传感器网络的介质访问控制层计算各个节点的传输功耗、初始能量和当前电量。

Step2 每一个节点将其传输功耗、初始能量和当前电量通过 TC 消息发送给其他节点,以实现信息的共享。

Step3 将传输功耗、初始能量和当前电量输入到 LSSVM 进行拟合,通过 PSO 算法对 LSSVM 的参数(σ, γ)进行优化。

Step4 根据建立的拟合模型对各个节点的剩余能量进行估计并量化。

Step5 将各个节点的剩余能量发送给其他节点,并将其保存到能量开销管理模块。

Step6 根据其他节点的初始能量、剩余能量估计值和传输功耗计算复合能量开销,并对保存数据进行更新操作。

Step7 如果估计值与实际值之间的误差超过阈值,则重新建立节点的剩余能量拟合模型。

Step8 选择复合开销最小的路径进行数据路由。

4 性能测试

4.1 测试平台

为了分析基于 PSO-LSSVM 的无线传感器网络路由算法的性能,选择 Matlab 2104 作为仿真平台,选择 OLSR 算法和文献[15]的算法进行对比实验。网络基础配置如表 1 所列, PSO 算法对 LSSVM 的参数(σ, γ)进行优化,参数值分别为 $\sigma=1.278, \gamma=500.15$ 。

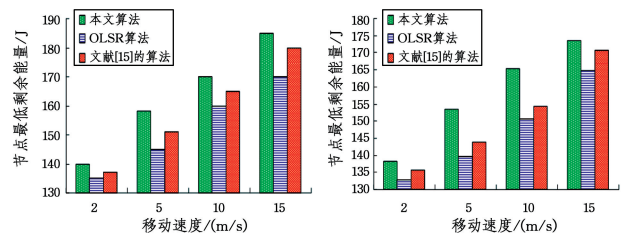
表 1 仿真网络的基础配置

Table 1 Basic configuration of simulation network

参数名	参数值	参数名	参数值
网络规模	500 m×500 m	数据包接收功率	0.395 W
数据包大小	512 Bytes	有效传播范围	250 m
数据包传输功率	0.66 W	数据包速率	40 kbps, 50 kbps
接收机灵敏度	3.65×10^{-10} W	节点移动速度	2 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s
节点数	80 个	空闲状态功率	0.3 W
移动模型	Random Trip Mobility Models	初始能量水平	400 J

4.2 结果与分析

不同节点移动速度下,节点的最低和平均剩余能量变化曲线如图 3 和图 4 所示。对图 3 和图 4 的实验结果进行分析可知,节点移动速度与节点最低剩余能量、平均剩余能量之间不是一种固定变化关系,在相同条件下,PSO-LSSVM 的最低和平均剩余能量均高于 OLSR 算法和文献[15]的算法。这是因为本文路由算法通过 PSO-LSSVM 对节点剩余能量进行了实时估计,可以实时了解各节点的能量使用情况;同时,在运行初期选择传输功率消耗最小的路径进行数据传输,减少了通信开销,在运行后期,节点之间的剩余能量差异很大,可以充分利用节点的能量提高能量的利用率,选择剩余能量高的节点进行数据传输,以保证各节点之间的能耗均衡,从而有效延长无线传感器网络的生存时间。

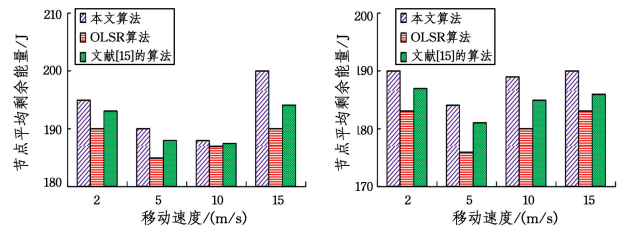


(a) 数据包速率为 40 kbps

(b) 数据包速率为 50 kbps

图 3 不同算法的节点最低剩余能量

Fig. 3 Minimum residual energy of nodes of different algorithms



(a) 数据包速率为 40 kbps

(b) 数据包速率为 50 kbps

图 4 不同算法的节点平均剩余能量

Fig. 4 Average residual energy of nodes of different algorithms

结束语 针对当前无线传感器网络路由算法存在的局限性,设计了基于 PSO-LSSVM 的无线传感器网络路由算法,通过 PSO-LSSVM 对节点的剩余能量进行实时估计,并根据估计结果选择理想的路由进行数据传输。测试结果表明,相对于其他无线传感器网络路由算法,PSO-LSSVM 减少了数据传输的时延,能够保证各点节点的能耗均衡,具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] DONG P, QIAN H Y, LAN S H. Opportunistic multipath routing protocol in wireless sensor networks [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2013, 37(3): 337-342. (in Chinese)
董萍, 钱延延, 兰少华. 无线传感器网络多径机会路由算法[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(3): 337-342.
- [2] ROBERT J M, OTROK H, CHIRIQI A. RBC-OLSR: Reputation-based clustering OLSR protocol for wireless Ad Hoc networks[J]. Computer Communications, 2012, 35(4): 487-499.
- [3] VRINDA G, RAJOO P. An improved energy aware distributed unequal clustering protocol for heterogeneous wireless sensor networks[J]. Engineering Science and Technology, An International Journal, 2016, 19(2): 1050-1058.
- [4] CHIRIHANE G, ZIBOUDA A, MOHAMED B. An adaptive clustering approach to dynamic load balancing and energy efficiency in wireless sensor networks[J]. Energy, 2016, 114(1): 647-662.
- [5] HUANG G F, TU W Q. Optimal resource allocation in wireless powered OFDM relay networks[J]. Computer Networks, 2016, 104(7): 94-107.

- [5] KALAI M R, GRACIA JACOB S. Improved Random Forest Algorithm for Software Defect Prediction through Data Mining Techniques[J]. International Journal of Computer Applications, 2015, 117(23):18-22.
- [6] WANG T, ZHANG Z, JING X, et al. Multiple kernel ensemble learning for software defect prediction[J]. Automated Software Engineering, 2016, 23(4):1-22.
- [7] THANGAVEL M, NASIRA G M. Support Vector Machine for Software Defect Prediction[J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2014, 9(24):25633-25644.
- [8] SUN Z J, XUE L, XU Y M, et al. Overview of deep learning[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(8):2806-2810. (in Chinese)
孙志军, 薛磊, 许阳明, 等. 深度学习研究综述[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(8):2806-2810.
- [9] HINTON G E, SALAKHUTDINOV R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. Science, 2006, 313(5786):504.
- [10] DENG L, DONG Y. Deep Learning: Methods and Applications [M]. Now Publishers Inc., 2014.
- [11] ZHOU Z H, FENG J. Deep Forest: Towards An Alternative to Deep Neural Networks[C]//IJCAI-17. 2017:3553-3559.
- [12] BREIMAN L. Random Forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1):5-32.
- [13] LIU F T, TING K M, YU Y, et al. Spectrum of variable-random trees [J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2008, 32(1):355-384.
- [14] WOLPERT D H. Stacked Generalization[J]. Neural Networks, 1992, 5(2):241-259.
- [15] ZIMMERMANN T, PREMRAJ R, ZELLER A. Predicting Defects for Eclipse [C] // International Workshop on Predictor MODELS in Software Engineering. IEEE, 2007:9.
- (上接第 133 页)
- [6] LIU P, YUAN P Y. Routing selection and channel assignment method for mobile Ad Hoc cognitive network[J]. Computer Science, 2017, 44(3):141-145. (in Chinese)
刘萍, 袁培燕. 移动自组织认知网络中的路由选择与信道分配方法[J]. 计算机科学, 2017, 44(3):141-145.
- [7] FAN X J, LIU L F, LI S Y. An opportunistic routing algorithm based on emergency scenario in Ad Hoc networks[J]. Computer Technology and Development, 2017, 27(3):6-11. (in Chinese)
范晓军, 刘林峰, 李思颖. 基于应急场景的自组织网络机会路由算法[J]. 计算机技术与发展, 2017, 27(3):6-11.
- [8] XIAO J, LIU W, TANG L. Routing algorithm for vehicular Ad Hoc network based on task allocation model [J]. Computer Engineering, 2017, 43(2):6-15. (in Chinese)
肖晶, 刘伟, 唐伦. 基于任务分配模型的车载自组织网络路由算法[J]. 计算机工程, 2017, 43(2):6-15.
- [9] LIU B T, ZHOU Y, CHEN Y R. Research on the routing algorithm optimizing lifetime of wireless Ad Hoc networks [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(3):463-466. (in Chinese)
刘半藤, 周莹, 陈友荣. 基于加权路由思想的无线自组织网络生存时间优化算法研究[J]. 传感技术学报, 2017, 30(3):463-466.
- [10] ZHANG D Y, CHEN Z G, ZHOU H B, et al. Energy-balanced cooperative transmission based on relay selection and power control in energy harvesting wireless sensor network[J]. Computer Networks, 2016, 104(20):189-197.
- [11] WANG N, LI D, LIU X L. Research of ant-colony-based connected dominating sets routing protocol in wireless Ad hoc networks [J]. Application Research of Computers, 2016, 33(12):3822-3827. (in Chinese)
王娜, 李丹, 刘晓樑. 无线自组织网络中基于蚁群算法结合连通支配集的路由协议[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(12):3822-3827.
- [12] CHEN X W, YUAN X B, LI B Q. Load balancing routing algorithm based on AODV for wireless sensor network [J]. Computer Engineering, 2015, 41(11):142-146. (in Chinese)
陈昕韡, 袁晓兵, 李宝清. 基于 AODV 的无线自组织网络负载均衡路由算法[J]. 计算机工程, 2015, 41(11):142-146.
- [13] ZHAO C, LI J, DAI K C, et al. Soft sensor modeling for penicillin fermentation process based on adaptive weighted least squares support vector machine [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2017, 41(1):100-107. (in Chinese)
赵超, 李俊, 戴坤成, 等. 基于自适应加权最小二乘支持向量机的青霉素发酵过程软测量建模[J]. 南京理工大学学报, 2017, 41(1):100-107.
- [14] TANG K Z, XIAO X, JIA J H, et al. Adaptive particle swarm optimization algorithm based on discrete estimate strategy of diversity [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2013, 37(3):344-349. (in Chinese)
汤可宗, 肖绚, 贾建华, 等. 基于离散式多样性评价策略的自适应粒子群优化算法[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(3):344-349.
- [15] LIU B T, ZHOU Y, CHEN Y R, et al. Research on the routing algorithm in MANETs based on the energy cost function [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(2):302-305. (in Chinese)
刘半藤, 周莹, 陈友荣, 等. 基于移动-能量代价函数的无线自组织网络路由策略研究[J]. 传感技术学报, 2017, 30(2):302-305.
- [16] CAO J L, YU J, WANG L L, et al. An energy-efficient clustering routing protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2014, 26(2):150-154. (in Chinese)
曹建玲, 余俊, 王路路, 等. 一种能量高效的无线传感器网络分簇路由协议[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2014, 26(2):150-154.