

The Research on Dynamic Power Management of Wireless Sensor Networks Based on Grey Model

WEI Hailong, LI Xunbo*, SHEN Yan, ZHANG Hai

(School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: The energy constraint for sensor nodes is the key factor that limit the life of wireless sensor networks. So an effective method of dynamic power management that based on grey model is proposed to save energy of wireless sensor networks. Historical data gathered of sensor node is used to forecast the future value with the method of grey model, meanwhile the parameters are adjusted automatically in the process of forecast so as to achieve the adaptive forecast. Compared with the algorithm of wavelet and AR, the accuracy of forecasting for grey model is improved. The basic idea is to decide the working pattern of the entire sensor networks by Sink, and in the next period sensor nodes do not send back their results if their observed values are not out of threshold. Reducing energy consumption of the entire sensor networks is by shortening the working hours and reducing transmitted messages between the nodes. Theory analysis and experiment result show that it is effective not only in the forecasting accuracy but also in the energy efficiency.

Key words: sensor networks; dynamic power management; grey model; forecast

EEACC:6150P

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2011.01.028

基于灰色模型的无线传感器网络动态功耗管理研究

魏海龙, 李迅波*, 沈艳, 张海

(电子科技大学 机械电子工程学院, 成都 611731)

摘要: 传感器节点能量受限是制约无线传感器网络使用寿命的关键因素, 为了节约传感器网络的能量, 提出了灰色模型的动态功耗管理(DPM)方法。该方法利用传感器节点上的历史数据应用灰色模型预测未来值, 预测过程中可以动态调整预测参数, 实现自适应预测, 和小波自回归预测算法相比, 提高了预测的准确性。基本思想是根据 Sink 节点上的数据来决定整个传感器网络的工作模式, 在下一个周期内若传感器节点的观测值不超过预定的阈值则不向 Sink 节点发送数据, 通过缩短传感器节点的工作时间, 降低节点间数据传输量来减少传感器网络的能量消耗。理论分析和实验结果表明本文提出的方法无论在预测准确性方面, 还是在节约能量方面都是有效的。

关键词: 传感器网络; 动态功耗管理; 灰色模型; 预测

中图分类号: TP212.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)01-0140-05

无线传感器网络有着广泛的应用前景, 已经深入到相关领域, 但是设计无线传感器网络最关键的约束之一是传感器节点(一种嵌入式系统)的电池能量有限, 这主要由于传感器节点的微型化, 而且由于物理条件限制难以给节点更换电池。近年来, 关于嵌入式系统的动态功耗管理已提出一些方法^[2-5]。这些方法主要是针对如何预测下一个空闲状态的时间长短来进行状态的切换, 如文献[2]提出的指数平均预测法, 该算法的缺点是预测过程需要大量的样本数据, 不符合嵌入式系统空闲状态的

预测要求, 而文献[3]虽然减少样本数据, 但是当遇到数据序列波动比较大时, 在序列波动处会产生比较大的预测误差。另外一些学者针对无线传感器网络提出了一些传感器节点功耗管理的方法^[6-11]。这些研究仅关心单个传感器节点的优化, 然而在实际应用中存在如节点状态切换时间过长, 最深睡眠时间设计不当, 网络开销大, 局部节点过早死亡等。因此本文提出一种新颖的适用于大规模无线传感器网络应用的节点功耗管理方法。在无线传感器网络应用中, 监测环境事件发生具有很强的偶然性, 传感器

节点上的所有设备没有必要时刻保持在正常的工作状态,所以处于休眠状态,甚至完全关闭,必要时再加以唤醒是一种非常有效的系统节能方案。DPM基本思想就是传感器节点内部各单元在空闲时有选择的关闭或者降低到低功耗状态,而在必要时将其唤醒或转换到正常工作状态。许多实验证明DPM技术在降低传感器节点能耗方面非常有效。本文是利用传感器节点上已有的数据应用灰色模型预测未来值,对传感器节点实行动态功耗管理,控制传感器节点观测时间,通信量以减少能量消耗。

1 灰色模型

1.1 灰色预测模型

灰色模型预测的基本思想是对离散的原始数据序列累加生成递增或递减的新序列,弱化其波动性,减少其随机性,使新序列能够体现原始序列变化的趋势,实现序列的有序化分析,满足预测的需要^[1]。常用的灰色模型为一阶单变量灰色模型GM(1,1),具体建模过程如下:

(1) 构造一阶累加(1-AG)序列 假设 $X_0 = \{X_0(1), X_0(2), X_0(3), \dots, X_0(n)\}$, 为原始样本数据序列,由 X_0 的元素进行一阶累加生成AGO序列

$$X_1(k) = \{X_1(1), X_1(2), X_1(3) \dots X_1(n)\}$$

其中: $X_1(i) = \sum_{j=1}^i X_0(j), i=1, 2, \dots, n。$

(2) 构造AGO序列 X_1 的紧邻均值生成序列

$$Z(k) = \{Z(1), Z(2), Z(3) \dots Z(n)\}$$

其中:

$$Z(k) = \gamma X_1(k) + (1-\gamma) X_1(k-1), k=2, 3 \dots n, \gamma \in (0, 1)。$$

(3) 构造GM(1,1)模型 应用GM(1,1)模型的方程 $\frac{dX_1(t)}{dt} + mX_1(t) = n$ 进行预测,方程中的参数 m 为发展系数,它反映序列 X_0 与 X_1 的发展趋势,参数 n 为灰色作用量,通过差分对方程进行近似离散化,得到线性方程组,对方程组用最小二乘法进行参数估计得到白化方程的二级参数 P, Q, R, S 的求解方法^[3]。

$$P = \sum_{k=2}^n Z(k), Q = \sum_{k=2}^n X_0(k)$$

$$R = \sum_{k=2}^n X_0(k) \times Z(k), S = \sum_{k=2}^n [Z(k)]^2$$

其中: $n \geq 4$, 通过二级参数 P, Q, R, S 可以求得参数 m 和 n 。

$$m = \frac{(P \times Q - (n-1) \times R)}{((n-1) \times S - Q^2)} \quad (1)$$

$$n = \frac{(Q \times S - P \times R)}{((n-1) \times S - Q^2)} \quad (2)$$

将 m, n 的值代入到原始序列的GM(1,1)模型的方程得:

$$\hat{X}_1(k+1) = (X_0(1) - n/m) \times e^{-m \times k} + n/m \quad (3)$$

$$\hat{X}_0(k+1) = \hat{X}_1(k+1) - \hat{X}_1(k) \quad (4)$$

根据式(3)和(4)预测原序列的发展规律,该算法的优点:适用于小样本非线性序列的预测,不要求大量原始数据样本,而且对样本的分布也无特别要求,计算量小。该算法的缺点:当遇到数据序列波动比较大时,在序列波动处会产生比较大的预测误差。

为此提出对灰色模型进行改进的方法,如果原始序列较平稳,则令: $Z(k) = \gamma X_1(k) + (1-\gamma) X_1(k-1)$ 中的 $\gamma = 0.5$; 如果数据序列有波动但波动不大, γ 的取值范围通常为(0, 0.5), 即旧数据的权值较大,反之 γ 的取值范围为(0.5, 1), 即新数据的权值较大。

1.2 基于灰色模型预测算法设计

使用灰色模型GM(1,1)对森林的未来温度值进行预测的过程如下:

(1) 构造原始数据序列 X_0 根据森林温度的局部相关性,采用森林局部温度的样本数据就可以满足预测要求,因为增加数据样本数量未必能提高预测精度,相反会扩大计算量。实践证明,对于短期的预测,选用较小的样本数据(样本数 ≥ 4) 就可以预测出系统当前的发展趋势进而获得较好的预测结果。按照循环滚动的方式不断置入最新数据 $X_0(k+1)$, 去掉最老数据 $X_0(1)$, 使数据序列长度保持不变,通过这种方式更新预测数据不但不会增加计算量,反而可以提高预测精度。

(2) 构造GM(1,1)预测模型并进行预测 按照灰色模型构造方法依次构造AGO生成序列 X_1 及 X_1 的紧邻均值序列 Z , 由序列 X_1 和 Z 计算预测模型的二级参数 P, Q, R, S 之后计算出一级参数 m 和 n , 因为在预测过程中不断地构造原始数据,这样就调整了GM(1,1)模型的一级参数 m 和 n , 实现预测过程的自适应调整,根据真值序列的变化趋势不断逼近真实值,提高了预测的准确性,由于本实验中选用4个样本数据,所以计算量较小。

(3) 功耗模式转换决策 如果 $\hat{X}_0(k+1)$ 大于设定的温度阈值 λ_f 或者 $(\hat{X}_0(k+1) - X_0(k+1)) / X_0(k+1)$ 大于设定的温度阈值 λ_p , 转换到特殊工作模式,反之则转换到预测模式。

(4) 等待本周期结束,记录此周期的实际温度值,返回(1)。

2 基于灰色模型的动态功耗管理

2.1 传感器网络的工作模式

将传感器节点的工作状态^[6]分为3类如表1所示:本文未考虑完全关闭状态,因为完全关闭状态下构成传感器节点的所有设备都关闭,与外界没有任何联系,只有通过CPU的硬中断来唤醒,然而异常事件的发生极具偶然性,所以很难设定睡眠时间,而且当返回到正常工作模式下不仅转换能耗大,而且转换时间也较长。

在传感器节点上采用灰色模型预测技术进行预测。根据预测值,在每个周期内,传感器网络由Sink节点决定以何种功率工作。设工作周期为 t ,第一个周期,传感器网络以感知工作状态 S_1 工作时间 t_1 ,然后以状态 S_0 工作时间 t_2 ,之后进入睡眠状态。在随后的几个周期内只保留能量充沛的部分节点从睡眠状态转入到感知状态 S_1 工作时间 t_1 ,但是不返回结果,其余的节点处于睡眠状态(称为预测模式),在之后的几个周期如果没有异常事件(节点观测温度值大于设定阈值温度)的发生,其余的传感器节点一直保持睡眠状态(称为完全预测模式)。如果检测到异常事件发生,那么传感器节点调整工作状态转换到特殊工作模式,特殊工作模式是传感器网络用于处理异常事件的工作模式,在特殊工作模式下传感器网络的工作周期缩短,每个周期传感器网络以感知工作状态 S_1 工作时间 t_1 ,随后以状态 S_0 工作时间 t_2 ,持续工作,并且每隔一段时间返回观测值^[12]。

表1 传感器节点工作状态

节点状态	感知设备	通信设备	内存、微处理器	消耗能量/mW	换时间/ms
S_0	开	收发	活动	1040	-
S_1	开	收	休眠	200	15
S_2	关	关	休眠	10	50

2.2 异常事件的检测和预报

以森林火灾的监测为例。假设 M_c 和 M_d 为Sink节点发出的信息,收到 M_c 信息的节点调整自己的工作状态至特殊工作状态以监视异常事件的发生,收到 M_d 信息的节点调整自己的工作状态至预测工作状态以节约能量; M_f 为普通传感器节点发出的信息表示该节点可能检测到了异常事件的发生^[12]。

假设普通传感器节点观测到的温度值为 T_f ,预测的温度值为 T_p ;Sink节点收集到的温度值为 T_{sf} ,预测的温度值为 T_{sp} ,则① T_f 大于设定的普通节点阈值 λ_f ;② $(T_p - T_f)/T_f$ 大于设定的普通节点阈值 λ_p ;

③ T_{sp} 大于设定的Sink节点阈值 λ_{sf} ;④ $(T_{sp} - T_{sf})/T_{sf}$ 大于设定的Sink节点阈值 λ_{sp} 。

①和②是普通传感器节点的报警条件,一旦满足,传感器节点向Sink节点发送 M_f 信息,Sink节点收到该信息后通过分析比较决定是否发出 M_c 信息,并决定是否将传感器网络的工作状态调整到特殊工作模式。如果Sink节点上的值满足③和④则发出 M_c 信息,将传感器网络的工作状态调整到特殊工作模式。

如果满足以上4个条件之一,则认为火灾即将发生,Sink节点发送 M_c 信息并命令所有传感器节点转变工作状态到特殊工作状态保证对异常事件的充分监视。

若Sink节点收到的温度观测数据低于设定的Sink节点阈值 λ_{sf} ,则可以解除火灾警报,Sink节点发送 M_d 信息,将传感器网络转入预测工作模式。

2.3 传感器节点的能量消耗情况

(1)传统周期模式 传感器网络在 N 个周期内消耗的能量为:

$$W_1 = (S_1 t_1 + S_0 t_2 + S_2 (t - t_1 - t_2)) N \quad (5)$$

(2)预测模式 传感器网络在 N 个周期内消耗的能量为:

$$W_2 = S_1 t_1 + S_0 t_2 + S_2 (t - t_1 - t_2) + (S_1 t_1 + S_2 (t - t_1)) (N - 1) \quad (6)$$

(3)完全预测模式 传感器网络在 N 个周期内消耗的能量为:

$$W_3 = S_1 t_1 + S_0 t_2 + S_2 (t - t_1 - t_2) + (S_2 t) (N - 1) \quad (7)$$

由式(5),(6),(7)可以看出预测模式与完全预测模式相比传统的周期模式节约了许多能量,尤其是完全预测模式应用在实时性要求不是很高的环境下节约的能量更多。对于传统周期模式,式(5)是所有传感器节点在 N 个工作周期内至少要消耗的能量,对于完全预测模式;式(7)是根据节点的剩余能量情况推导的,满足每次调整网络时能量充足的小部分节点在 N 个工作周期内至少要消耗的能量,其余节点消耗的能量小于 W_2 。

3 仿真实验及结果分析

对于DPM的预测策略来说,预测算法的准确性至关重要,因为在预测过程中可能会出现过高预测与过低预测,这样不仅影响传感器网络的能量消耗问题而且也影响传感器网络的实时性,过高预测是指预测的未来温度值高于实际的温度值使传感器节点过早的从睡眠模式被唤醒,或者比较严重的情况是预测值大于设定的温度阈值使节点转换到特殊模

式,此时传感器节点就会处在高功耗模式下进行监视,浪费大量的能量,这样就会缩短传感器节点的寿命,进而缩短整个传感器网络的寿命,过低预测是指预测的未来温度值低于实际的温度值,传感器节点没有及时被唤醒延迟了服务,进而影响整个传感器网络的实时性。因而在权衡网络能量消耗与实时性的情况下,尽量设计预测准确性高的预测算法来降低出现过高预测与过低预测的概率。

为了验证本文算法的合理性,应用本文的预测算法对文献[12]的实验数据进行实验,并与文献[12]提出的小波自回归预测算法进行比较。实验在一台安装有 MATLAB7.0 软件的 PC 机上进行,初始设置 $\gamma=0.5$,随后 γ 的值根据数据序列的波动性进行适当调整。设温度阈值 λ_f 与 λ_g 的值为 22.0, λ_p 的值为 0.008 9, λ_{sp} 的值为 0.009 0。由预测结果比较两条预测曲线与真实值曲线拟合的效果可以看出,本文算法的预测值更接近真实值,而且由图 1 和表 2 可以看出当数据序列出现波动时小波自回归预测算法会出现较大的预测误差,而本文提出的灰色模型预测算法虽有误差,但是此误差远小于应用小波自回归预测产生的误差,当数据序列波动过后,本文算法能够迅速进行调整,使预测结果能更快地逼近真实值而小波自回归预测算法逼近速度较慢,而且总是和真实值保持着一定的误差。由实验结果可知本文提出的灰色模型预测算法在预测准确性方面明显高于小波自回归预测算法。

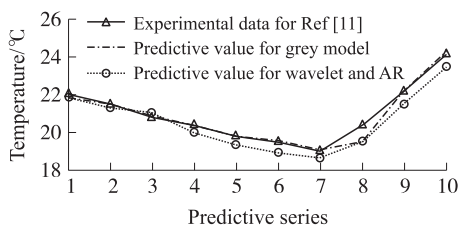


图 1 两种预测算法的曲线图

表 2 两种预测算法的预测值及误差对比

观测值/°C	小波自回归预测	灰色模型预测	小波自回归相对误差	灰色模型相对误差
22.0	21.8	21.85	0.2	0.05
21.5	21.3	21.45	0.2	0.05
20.8	21.0	20.89	0.2	0.09
20.4	20.0	20.35	0.4	0.05
19.8	19.3	19.82	0.5	0.02
19.5	18.9	19.55	0.6	0.05
19.0	18.6	19.08	0.4	0.08
20.4	19.5	19.51	0.9	0.89
22.2	21.5	22.20	0.7	0
24.2	23.5	24.30	0.7	0.1

观察以下几种工作模式下的传感器节点的能量消耗^[12]:①传统周期工作模式 传感器节点每个周期内感知时间为 t_1 ,感知并通信时间为 t_2 ,休眠时间为 $t-t_1-t_2$ 。这是周期检测型传感器网络中最常见的工作方式,其缺点是传感器网络消耗能量较大,而且传感器网络按照固定的模式工作,由于节点能量消耗的不均衡性,使距 Sink 节点近的节点过早的消耗完能量,导致传感器网络出现盲点,当盲点达到一定数量整个网络就会瘫痪,而且当异常事件发生时传感器节点仍然要进入睡眠状态,这样就无法保证实时监测事件。②预测工作模式 根据 Sink 节点上的数据决定传感器网络的工作模式。③完全预测工作模式。④理想模式 传感器节点一直处于睡眠状态,直到异常事件的发生。

设工作周期为 1 h,感知时间 t_1 为 50 s,感知并通信的时间 t_2 为 10 s。由图 2 可知,采用灰色模型预测算法,对传感器节点进行动态功耗管理比传统周期性返回观测值算法节约了大量的能量,尤其是完全预测模式下传感器节点消耗的能量几乎接近于理想模式下消耗的能量,而且随着网络运行时间越长预测模式和完全预测模式节约的能量越明显。

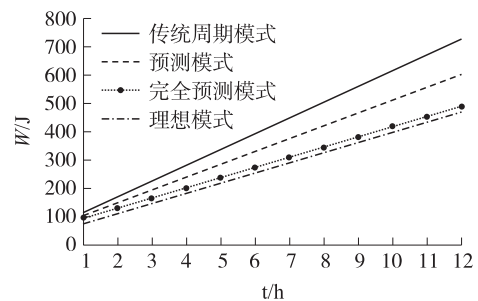


图 2 不同工作模式下传感器节点消耗的能量

4 结束语

利用灰色模型,对 Sink 节点上的数据进行趋势分析和预测,具有对样本数量要求少,计算量小,能自适应调整预测参数,快速的逼近真实值的优点。应用在无线传感器网络的动态功耗管理技术中,可以准确的预测传感器节点的未来值,进而能够准确的调整传感器网络的工作模式,降低了出现过高预测与过低预测的概率,可以在满足性能的前提下最大可能的减少传感器网络的能量消耗,延长网络的生存期。

参考文献:

- [1] 邓聚龙. 灰理论基础(第 1 版)[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [2] 钟伟军,刘业明,彭刚. 嵌入式动态电源管理预测算法研

- 究[J]. 微电子与计算机, 2005, 22(11): 56-58.
- [3] 钟伟军, 刘业明. 基于灰色模型的动态功率管理空闲预测算法[J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(11): 965-966.
- [4] Abbasian A, Hatami S, Afzali-kusha A, et al. Event-Driven Dynamic Power Management Based On Wavelet Forecasting Theory [C]//Circuits and Systems, ISCAS'04. Proceedings of the 2004 International Symposium, 2004, 5: 325-328.
- [5] Hwang A C H, Wu C H. A Predictive System Shut Down Method for Energy Saving of Event-Driven Computer [C]//IEEE/ACM Int Conference Computer Aided Design San Jose CA, 1997: 28-32.
- [6] Sinha A, Chandrakasan A. Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Design and Test of Computers, 2001, 18(2): 62-74.
- [7] Chiasserini C F, Rao R R. Improving Energy Saving in Wireless Systems by Using Dynamic Power Management [C]//IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2: 1090-1100.
- [8] Rodrigo M Passos, Claudionor J N Coelho Jr, Antonio A F Loureiro, et al. Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks: An Application-Driven Approach [C]//Second Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS'05), January, 2005: 2-3.
- [9] Luo R C, Tu L C, Chen O. An Efficient Dynamic Power Management Policy on Sensor Network [C]//IEEE Proceedings of the 19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA'05), 2005: 1-4.
- [10] Benini L, Bogliolo A, Micheli G D. A Survey of Design Techniques for System-Level Dynamic Power Management [J]. IEEE Trans VLSI, 2000, 8(3): 301-304.
- [11] Brock B, Rajamani K. Dynamic Power Management for Embedded System [C]//IEEE International System-On-Chip (SOC) Conference, September, 2003: 17-20.
- [12] 李国徽, 江德平. 基于流预测的无线传感器网络动态功率管理[J]. 华中科技大学学报, 2007, 35(7): 28-30.
- [13] Gupta R K, Iran S, Shukla S K. Formal Methods for Dynamic Power Management [J], [C]//Computer Aided Design, ICCAD - 2003 International Conference 2003, 9(13): 874-881.



魏海龙(1986-), 男, 内蒙古乌兰察布市察右前旗人, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络功耗管理, weihailong2008@163.com;



李迅波(1963-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为测试计量技术及仪器, zwest_213@163.com。