

无线传感器网络在桥梁健康监测中的应用研究

唐旋来,汪秉文,汤强,戴志诚

(华中科技大学 控制科学与工程系,湖北 武汉 430074)

摘要:针对无线传感器网络技术在桥梁结构健康监测中的应用,研究并开发了基于无线传感器网络的桥梁结构健康监测系统。采用能量均衡分簇路由算法、时间同步算法和能量管理算法,组建了低功耗、节点能量消耗均衡、具有多跳路由结构的无线传感器网络。同时,应用加速度传感器检测桥梁振动的加速度数据,通过FFT变换由加速度数据得到桥梁的固有频率,并根据固有频率分析桥梁的健康状况。系统在公路高架桥中进行了应用试验,试验结果表明,系统便携性好,监测数据可靠。

关键词:无线传感器网络;桥梁健康监测;路由;时间同步;能量管理

中图分类号:TP277

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2011)01-0174-04

Health Monitoring of Bridge Using Wireless Sensor Networks

TANG Xuan-lai, WANG Bing-wen, TANG Qiang, DAI Zhi-cheng

(Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A wireless sensor network (WSN) for bridge health monitoring (BHM) is designed, implemented, deployed and tested on a road viaduct. The system formed a low-power, consuming energy balance and a multi-hop routing for wireless sensor networks, using energy balance clustering routing algorithm, time synchronization algorithm and energy management algorithms. The system tested in a road viaduct, using accelerometers to collect the real-time ambient vibrations of the bridge. In the application, the sensor nodes were arranged in the bridge, setting up a multiple sub-cluster multi-hop routing network architecture. Eventually, the natural frequency of bridge was got from the acceleration data through FFT transform. The test result show that the system is portable and reliable.

Key words: wireless sensor network; bridge health monitoring; routing; time synchronization; energy management

0 引言

无线传感器网络是当前国内外科技领域的研究热点,节点具有功耗低、体积小、智能化程度高等特点。将无线传感技术应用于桥梁健康监测,有利于整个监测系统的小型化、低成本和智能化发展^[1,2]。

目前,无线传感器针对桥梁健康监测方面的应用主要有:UC Berkeley的Sukun Kim等人设计了基于TinyOS的无线传感器网络系统,并实现了对金门大桥结构健康的监测^[3]。Stanford的Jerome P. Lynch等人设计了一种无线组块监测系统(Wireless Modular Monitoring Systems, WiMMS),并在美国Alamosa峡谷的大桥进行了试验^[4]。在上述应用中都组建了具有多跳路由的无线传感器网络,应用加速度传感器检测

桥梁振动数据,经过数据处理最终得到桥梁振动的固有频率来判断桥梁的健康情况。

文中应用无线传感器网络技术,研究并开发了基于无线传感器网络的桥梁健康监测系统。系统体积小,功耗低,组建了分簇的多跳网络,通过加速度传感器测量桥梁的振动来对桥梁的固有频率进行分析。

1 系统设计

无线传感器网络由分布在监测区域的大量传感器节点组成,节点通过无线通信的方式形成一个多跳的自组织网络系统。目标数据在网络内进行传输,最终通过汇聚节点发送至用户终端^[5]。

1.1 传感器节点

无线传感器网络由大量传感器节点组成,每个传感器节点是一个典型的微型嵌入式系统^[6]。系统所开发的系统传感器节点硬件的组成如图1所示。

在图1中,单个传感器节点包括电源供应,数据采集,处理器,数据存储和无线通信五个部分。电源供应部分包括锂电池,电源管理电路;数据采集包括

收稿日期:2010-05-18;修回日期:2010-08-21

基金项目:国家自然科学基金项目(60773190,60802002)

作者简介:唐旋来(1986-),男,硕士研究生,研究方向为无线传感器网络等;汪秉文,教授,博士生导师,研究方向为智能控制与机器人技术、计算机集成控制与网络技术等。

SD1221 加速度传感器和信号处理电路;处理器部分选择低功耗高性能的 MSP430 系列芯片;系统采用 1M Byte 的串行 Flash 芯片 M25P80 作为数据存储载体, CC2420 为系统无线通信的核心器件。

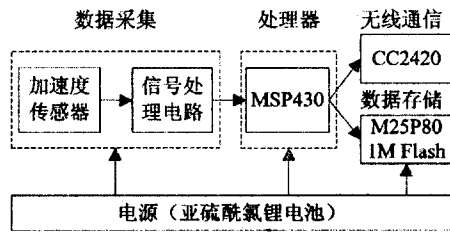


图1 节点硬件框图

1.2 软件构架

系统软件开发基于 UC Berkeley 开发的无线传感器网络操作系统 TinyOS 平台进行^[7], 软件结构如图2所示, 图中词汇为软件中各个模块和接口名称。

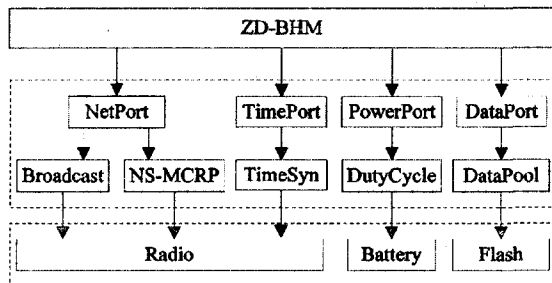


图2 节点软件框图

在图2中, 系统软件从上至下分为应用层, 协议层和硬件抽象层。三层之间通过服务接口进行通信。应用层提供包括基于监测任务的应用软件(ZD-BHM)服务; 协议层包括路由协议(NS-MCRP), 时间同步协议(TimeSyn), 能量管理协议(DutyCircle), 以及传感器数据管理(DataPool), 各个协议模块通过接口为应用层提供服务; 硬件抽象层对节点硬件进行驱动和抽象, 提供硬件驱动接口供协议层进行调用。

2 算法研究

应用于桥梁结构健康监测的无线传感器网络满足以下几个条件:

- (1) 网络建立后, 网络中各个节点的物理位置确定。网络中节点的物理位置信息相互透明。
- (2) 作为桥梁结构健康监测应用的无线传感器网络是小规模的网络, 即网络中的节点数目有限。
- (3) 根据文献[8], 节点发送数据和接收数据的能量模型分别为

$$E_{\alpha}(l, d) = \begin{cases} lE_{\text{elec}} + l\epsilon_f d^2, & d < d_0 \\ lE_{\text{elec}} + l\epsilon_{mp} d^4, & d \geq d_0 \end{cases}$$

$$E_{rx}(l, d) = lE_{\text{elec}}$$

由文献[8]可知, $l\epsilon_f d^2, l\epsilon_{mp} d^4$ 远大于 lE_{elec} , 这意

味着在节点收发数据过程中, 数据发送的距离 d 决定了节点的能量消耗。

下面根据这几个条件, 分别阐述路由算法, 时间同步算法, 能量管理算法的设计思想和实现过程。

2.1 路由算法

由于节点与节点之间的通信距离有限, 无线传感器网络的路由协议是一种多跳的分簇路由协议, 距离汇聚节点远的节点需要通过网络内的中继节点进行转发。系统采用了邻居多跳分簇路由协议 NS-MCRP^[9], 使网络内各个节点消耗的能量均衡。NS-MCRP 的核心算法包括节点近邻表的建立和节点的分簇。

网络中的每个节点都建立了一张近邻表, 表中记录了当前节点的一跳邻居节点的信息, 包括节点 ID, 节点位置, 剩余能量。节点 N_i 的近邻表建立过程如图3所示。网络初始阶段, 根据网络中各个节点的物理位置可以计算出当前节点 N_i 有效通信距离内的节点, 这些节点组成一个近邻集合 TS , TS 的大小为 N 。节点 N_i 的近邻节点集合为 S_i , E_{ik} 为节点 N_i 与节点 N_k 之间传输能耗, E_{ij} 为节点 N_i 与节点 N_j 之间传输能耗, E_{jk} 为节点 N_j 与节点 N_k 之间传输能耗。最终, 根据集合 S_i 即可以建立节点 N_i 的近邻表。

```

1:  $S_i = TS$ 
2: for  $k = 1$  to  $N, N_k \in TS$  do
3:   for  $j = 1$  to  $N, j \neq k, N_j \in TS$  do
4:     if  $E_{ik} > E_{ij} + E_{jk}$ 
5:        $S_i = S_i - \{N_k\}$ 
6:     endif
7:   endfor
8: endfor
9: return  $S_i$ 

```

图3 建立近邻表伪代码

由于网络规模有限, 且节点的物理位置确定, 可以将 NS-MCRP 中节点的分簇算法进行简化。在小规模的网络中, 根据节点的物理位置信息, 按照物理距离的远近将网络中节点进行分簇, 即距离相对较近的节点在同一个簇内, 簇头的选择在同一簇内的节点之间进行。在网络的运行过程中, 每次传输后, 数据汇聚节点以簇为单位, 对同一簇内的节点能量进行比较, 提取剩余能量最大的节点作为下次传输的簇头, 并将簇头信息发送至网络内所有节点。

2.2 时间同步算法

根据上面网络中满足的条件 1, 2 可知, 系统所组成的网络具有规模小, 网络负载较轻, 传播延时小, 可靠性高的特点。因此在网络的传输过程中, 成立下面两个条件:

(1) 节点与同一网络内其他节点的传播延时 t_{tran} 是一个可以近似确定的量。

(2) 汇聚节点的信息能够可靠地传递到达网络内所有节点。

时间同步协议的设计是基于传播延时补偿的思想^[10], 即对同步过程中, 数据传输时间 t_{tran} 和包处理时间 t_{elec} 进行补偿来提高网络内时间同步的精度。节点的时间以汇聚节点的时间作为同步基准, 其实现的过程如下所示, 其中每一个节点都设置有一个时间同步标志, 用来标记是否完成时间的同步。

步骤 1: 网络中数据汇聚节点对网络内的传感器节点发送带有同步时间 T_{syn} 的广播信息。

步骤 2: 接收到该时间同步广播信息的节点将本地时间 T_{local} 与同步时间 T_{syn} 进行校准, 校准公式如下所示:

$$T_{\text{local}} = T_{\text{syn}} + t_{\text{tran}} + t_{\text{elec}}$$

其中 t_{tran} 为广播信息的传播时间, t_{elec} 为节点处理数据包的时间。校准完毕后设置时间同步标志。以 T_{local} 为基准更新广播信息的同步时间, 将广播信息发送给下一跳邻居节点。

步骤 3: 下一跳的邻居节点接收到同步广播信息, 提取最先接收到的广播信息来校准自己的本地时间。并发送同步信息至邻居节点, 若所有的邻居节点都已完成时间同步, 则根据 2.1 节路由协议发送确认信息。

2.3 能量管理算法

网络内节点具有休眠和活跃两种工作状态: 当节点处于休眠态时, 无线通信模块处于等待接收状态, 包括 CPU 在内的其余外设处于休眠状态, 节点功耗达到很低的水平。当节点处于活跃态时, 节点执行数据采集、处理和发送。其中, 节点由休眠态转为活跃态称为唤醒, 反之称为休眠^[11]。

处于休眠态的节点启动定时器, 定时时间为采样时间 T_{sample} , 当定时时间到则产生定时中断, 唤醒节点, 进入活跃态; 同时, 休眠态的节点接收到数据包后, 节点也可以被唤醒。

在网络的数据采样时间间隔 T_{sample} 内, 可以分成如下式的两个部分:

$$T_{\text{sample}} = T_{\text{rest}} + T_{\text{active}}$$

其中, T_{rest} 为网络的休眠时间, T_{active} 为网络的活跃时间。因此在时间 T_{sample} , 节点的平均能耗为式(1):

$$E_{\text{ave}} = \frac{E_{\text{rest}} T_{\text{rest}} + E_{\text{active}} T_{\text{active}}}{T_{\text{sample}}} \quad (1)$$

令 $\partial = \frac{T_{\text{active}}}{T_{\text{sample}}}$, 结合式(1), 得到式(2):

$$E_{\text{ave}} = (1 - \partial) E_{\text{rest}} + \partial E_{\text{active}} \quad (2)$$

根据节点实际功耗的特点, 有 $E_{\text{rest}} \ll E_{\text{active}}$, 由式

(2) 可以近似得到式(3):

$$E_{\text{ave}} = \partial E_{\text{active}} \quad (3)$$

根据式(3)可知, 在节点的生命周期内, ∂ 在一定程度上决定了节点的使用寿命。根据实际的要求, 尽量减少 ∂ 的值可以延长网络节点的使用时间。

3 应用实例

下面描述该系统在某高架桥上的应用。在桥梁结构健康监测中, 桥梁结构的固有频率是一个至关重要的参数, 直接反映桥梁的健康状况。系统中采用加速度传感器检测桥梁的垂直震动状态, 最终经过数据分析软件得到桥梁的固有频率, 与桥梁固有频率的设计值比较得出: 该桥梁结构健康。

3.1 节点部署

高架桥总共有 18 垮, 每垮长 16 米。根据桥梁的土木结构, 节点分别布置于第 7 垮至第 11 垮的中心, 1/4 中心和跨端处。其中基站节点位于第 9 垮。节点布置如图 4 所示, 总共布置有 24 个节点, 在网络构建时将节点以跨为单位进行分簇, 每个簇通过簇头与基站进行通信, 图 4 中黑色实心节点即为簇头, 笔记本电脑作为用户终端与数据汇聚节点相连。

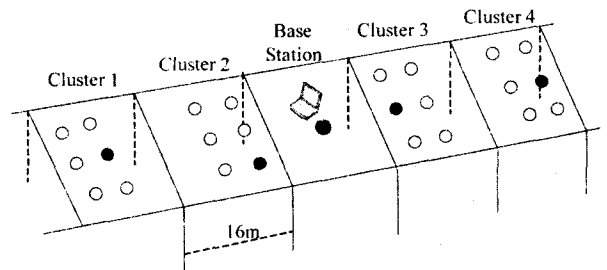


图 4 节点部署示意图

3.2 数据分析

初始阶段, 用户软件通过数据汇聚节点向网络发送控制命令启动网络, 并对网络进行时间同步。节点以 50Hz 频率采集加速度数据, 并将数据发送至数据汇聚节点, 数据汇聚节点将传感器数据进行分类存储处理。整个监测过程进行约 2 个小时。

图 5 为 5 号传感器节点采集到的部分加速度数据。其中纵轴表示桥梁垂直方向振动的加速度值, 单位为 mg。横轴表示采样点数 (与时间相关)。由图 5 可知, 监测过程中, 在车辆等外力的作用下, 桥梁在不停地振动, 其中振动的加速度值反映外力的作用效果。图 5 中加速度最大值约为 26mg, 表示此时车辆给桥梁造成了较大的振动。

对桥梁振动的加速度数据进行频谱分析, 得到功率谱密度 (PSD)。在这里采用经典谱分析方法^[12], 具体算法如下:

$$\hat{p}_{xx}(f) = \frac{|X_L(f_k)|^2}{f_s L}$$

$$f_k = \frac{k f_s}{N} \quad k = 0, 1, \dots, N-1, f_s \text{ 是采样频率, } L \text{ 为}$$

信号长度,其中 $X_L(f_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_L[n] e^{-2\pi j k n / N}$, 计算步骤:

$$k = 0, X_L(0) = \sum_{n=0}^{N-1} x_L[n] e^{-2\pi j 0 n / N}$$

$$k = N-1, X_L(N-1) = \sum_{n=0}^{N-1} x_L[n] e^{-2\pi j (N-1) n / N}$$

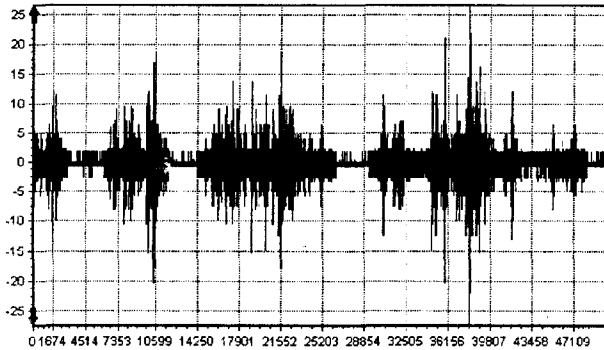


图5 加速度数据

根据上面的算法,得到5号节点采样数据对应的功率谱密度如图6所示。加速度数据的功率谱密度反映了数据中各个频率分量的作用大小。图中幅度峰值对应的频率值为 $f_0 = 7.907\text{Hz}$, 根据功率谱密度的意义,桥梁的固有频率即为 $f_0 = 7.907\text{Hz}$ 。根据桥梁结构的建设资料,其设计的固有频率理论值为 7.5Hz ,两者差值在允许范围内。表明系统监测到的数据是有效的,桥梁处于健康状态。

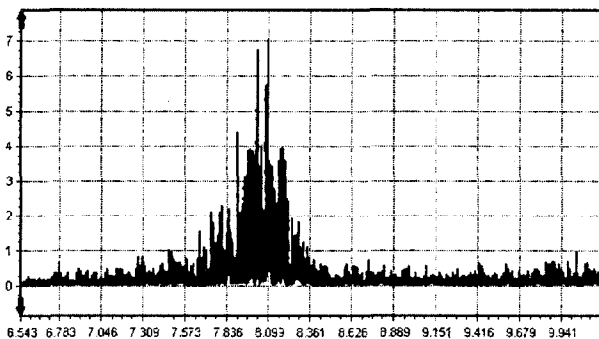


图6 测试结果分析

4 结束语

经实践证明,基于无线传感器网络技术的桥梁健康监测系统体积小,安装方便,实时性好,检测结果可靠,适用于对桥梁健康状态的实时监测。

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: a survey [J]. IEEE Computer Networks, 2002, 38: 393-422.
- [2] Kim N S. Wireless sensor networks for structural health monitoring [D]. University of California at Berkeley, 2005.
- [3] Kim S, Pakzad S. Health Monitoring of Civil Infrastructures Using Wireless Sensor Networks [C] // In: 6th international conference on Information processing in sensor networks. Cambridge, Massachusetts, USA: [s. n.], 2007: 254-263.
- [4] Lynch J P, Law K H, Anne, et al. Validation of a Wireless Modular Monitoring System for Structures [C] // SPIE's 9th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials. San Diego, CA, USA: [s. n.], 2002: 17-21.
- [5] 吴春倩, 郑明春, 秦继林. 无线传感器网络协议研究 [J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(8): 27-29.
- [6] 姜连祥, 汪小燕. 无线传感器网络硬件设计综述 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2006(11): 13-16.
- [7] Hill J, Szewczyk R, Culler A. System architecture directions for networked sensors [M] // In: Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. [s. l.]: [s. n.], 2000: 93-104.
- [8] Heinzelman W B, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [9] 汤强, 汪秉文. 邻居多跳分布式分簇路由协议 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(2): 26-29.
- [10] 胡晓娅, 朱德森, 汪秉文. 网络控制系统的时延补偿策略研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2005(11): 1932-1934.
- [11] 孙利民, 李建中, 陈渝, 朱红松. 无线传感器网络 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [12] 姚天任, 江太辉. 数字信号处理 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.

(上接第173页)

- [5] 趙延紅, 掛下哲郎. NetDiskアーキテクチャにおけるスイッチの論理回路設計 [C] // 電気関係学会九州支部第56回連合大会講演論文集, 2003.
- [6] 石田晴久. マイコンコンピュータのプログラミング [M]. 共立出版, 1978.
- [7] 楠田喜宏. マイコン再入門 [M]. 日刊工業新聞社, 1981.

- [8] 相原隆文. 手作りマイコン [M]. 技術評論社, 1985.
- [9] 伊藤誠. 基本ハードウェア技術 [M]. CQ出版社, 1978.
- [10] 车海康, 杨银堂, 周拥华, 等. 数值协处理器中微程序设计 [J]. 微电子学与计算机, 2003, 20(6): 57-61.
- [11] Hayes J P. Computer architecture and organization [M]. McGRAW-HILL International Editions, 1988.
- [12] 王文东, 李竹林, 尚建人. 汇编语言与C语言的混合程序设计 [J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(8): 18-20.