

# 振动信号无线传输的数据压缩编码算法\*

王楠, 孟庆丰, 郑斌

(西安交通大学润滑理论与轴承研究所 西安, 710049)

**摘要** 无线传感器网络节点资源非常有限,若实时采集传输振动信号,由于信号变化快,数据量大,网络节点将会因为资源过早耗尽而失效,并且上位机需要很大的数据存储空间。为了解决上述问题,提出了一种针对振动信号进行压缩编码的算法,并编程将其移植到节点DSP中。首先,采用5/3提升小波对振动数据进行处理;然后,利用嵌入式零数小波对得到的小波系数进行压缩编码;最后,为了进一步提高压缩比,便于节点传输数据。对上述结果进行霍夫曼压缩编码,对数据的解码、解压缩和重构则由上位机软件完成。讨论了初始阈值和小波分解层数的选取对压缩效率的影响。实验结果表明,该算法可有效压缩振动信号(压缩比高达9.5),且在保留其频域主要特征的情况下,使传输数据量大大减少,节省了网络节点资源和上位机存储空间。

**关键词** 振动信号;无线传感器网络;5/3提升小波;嵌入式零数小波;霍夫曼压缩编码算法

**中图分类号** TN91; TN92; TH325

## 引言

无线传感器网络中节点资源十分有限,主要体现在电池能量、处理能力、存储容量以及通信带宽等几个方面。理论分析和实验研究表明,无线传感器网络环境下,数据通信在网络能耗中占据主要因素。每传输1 Byte数据所消耗的能量可以用来执行数千条CPU指令,而且所消耗的时间也少得多;因此,可以用计算量的增加(如压缩编码、融合等算法)来换取通信量的降低<sup>[1]</sup>。

若采集传输温度、湿度等信号,由于信号变化缓慢,故采样时间间隔大,且每次传输的数据量较小,对于能量供应和存储空间有限的无线传感器节点来说可以承受。但对于实时性要求较高、变化迅速且数据量很大的振动信号来说,若对其进行实时采集并传输,则网络节点能量将很快耗尽,在计算速度和存储空间方面对转发数据的路由节点和接收数据的基站乃至上位机都有相当大的压力。笔者开发的网络节点为DSP+单片机+射频模块结构,DSP有128 k的FLASH,外扩512 k的SRAM,单片机则只有48 k的FLASH。若以20个网络节点连续采集传输并保存30 d振动数据(每个网络节点采样频率为2 kHz,采样点数为1 024,采样通道为4)为例,则每个节点

每个采样周期(0.5 s)要采集8 k的振动数据并发送出去,上位机共需792 G Byte的存储空间。此外,高频率读写硬盘将缩短硬盘寿命,容易产生突发性硬盘损坏,引起数据丢失,造成不可预计的损失<sup>[2]</sup>。因此,提出对振动信号进行压缩、编码后再传输的思路,开发了相应的算法,并通过实验和数据压缩评价标准对此算法进行了验证和分析。该算法以第2代整数小波变换为基础,结合了图像处理中常用的嵌入式零数小波和霍夫曼编码算法,具有“原位计算”、压缩效率高、易于在硬件中实现的特点。

## 1 算法原理

### 1.1 5/3提升小波

Mallat小波算法基于卷积运算,运算过程复杂,且需要大量的存储单元,用硬件难以实现。Sweldens在此基础上,创建了一种新的小波构造方法(提升算法),被称为第2代小波变换。提升算法不依赖于傅里叶变换,降低了计算量和复杂程度,运算效率提高了1倍。整个算法过程仅含有对整数的移位和加减运算,完全实现了“原位计算”,即经过变换的数据可以存入原始数据位置,不需要额外开辟内存空间,耗费存储单元少,节省了硬件开销,非常适

\* 国家自然科学基金资助项目(50875196);国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(2009CB724304)  
收稿日期:2011-09-05;修改稿收到日期:2011-12-21

合于在无线传感器网络节点中的应用<sup>[1]</sup>。

提升算法分为分裂、预测、更新3个步骤,算法框架如图1所示。假设数据序列  $X = \{x(k), k \in Z\}$ , 提升过程如下<sup>[3]</sup>。

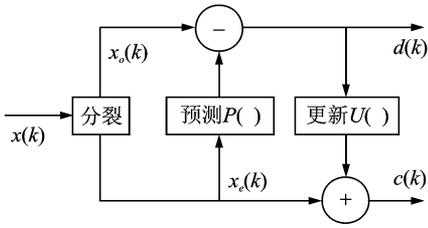


图1 提升算法框架

1) 分裂。将数据序列  $\{x(k), k \in Z\}$  分为奇数序列  $X_o = \{x_o(k), k \in Z\}$  和偶数序列  $X_e = \{x_e(k), k \in Z\}$

$$x_o(k) = x(2k + 1) \quad (k \in Z) \quad (1)$$

$$x_e(k) = x(2k) \quad (k \in Z) \quad (2)$$

2) 预测。设  $P(\cdot)$  为预测器,用  $X_e$  预测  $x_o(k)$ , 定义预测偏差为细节信号

$$d(k) = x_o(k) - P[X_e] \quad (k \in Z) \quad (3)$$

3) 更新。设  $U(\cdot)$  为更新器,在细节信号  $D = \{d(k), k \in Z\}$  的基础上更新  $x_e(k)$ , 其结果定义为逼近信号

$$c(k) = x_e(k) + U[D] \quad (k \in Z) \quad (4)$$

5/3 提升小波是指低通滤波器长度为5、高通滤波器长度为3的一种提升整数小波。它是最新图像处理标准 JPEG2000 中规定的标准提升小波变换基,在图像压缩中得到了广泛应用。经编程比较,其计算量要比9/7提升小波小很多,且压缩性能差别不大。考虑到无线传感器网络的能量敏感性,选用5/3小波来进行信号的压缩编码,公式如下

$$\begin{cases} d(2k+1) = x(2k+1) - \left[ \frac{x(2k) + x(2k+2)}{2} \right] \\ c(2k) = x(2k) + \left[ \frac{d(2k-1) + d(2k+1)}{4} + \frac{1}{2} \right] \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $[\cdot]$  表示取整运算;  $1/2$  为修正值,目的是消除由于取整而引入的误差。

由式(5)可以看出,提升算法是“原位计算”,即小波变换时在原位计算各个系数,计算的系数可以直接替代原始数据而不需要附加数据存储空间。

## 1.2 嵌入式零数小波

嵌入式零树小波<sup>[4]</sup> (embedded zerotree wavelet, 简称 EZW) 是基于小波变换的压缩编码算法。零树编码是渐进式编码,即将信息编码为比特

流,随着更多的比特位加入,解码出的信号将包含更多的细节和更少的误差。同其他编码方法相比,嵌入式零树编码计算相对简单,压缩能力高,而且能够实现可变的压缩比<sup>[5]</sup>。

EZW 是简单有效的图像编码算法,虽然是针对二维信号提出的,但其同样可应用于任意维信号。笔者将其用于一维振动数据的压缩编码。一维信号小波变换后的系数呈金字塔结构,每个较粗尺度上的系数看做父节点,它在较细尺度对应位置上有2个子节点,而低频系数在下一尺度上只有1个子节点,从而构成一个一维小波系数的树结构。零树编码算法根据阈值  $T$  将小波系数分为以下4类。

1) POS: 正重要系数(大于阈值  $T$  的正系数)。

2) NEG: 负重要系数(绝对值大于阈值  $T$  的负系数)。

3) ZTR: 零树根(其后代均为次要系数的次要系数)。

4) IZ: 孤独零(其后代中有重要系数的次要系数)。

零树编码设置了主表和辅表。主表保存次要系数的坐标,其输出信息起到了恢复各重要值空间位置结构的作用;辅表保存重要系数的幅值。压缩编码过程如下<sup>[5-6]</sup>:

1) 初始化阈值  $T_0 = 2^{\lceil \log_2(\max\{c_i\}) \rceil}$ , 其中  $c_i$  为信号分解后的小波系数,建立主、辅表存储空间,开启辅助扫描堆栈和编码结果存储空间;

2) 主扫描,根据阈值  $T_i$  将小波系数分为上述4类结果,并将重要系数的符号信息和数值存入主表中;

3) 辅扫描,将主表中的重要系数进行量化,并将量化符号存入辅表,编码输出;

4) 门限  $T_i = T_{i-1}/2$ , 重复步骤1~3,当达到给定的压缩比或失真率等指标,退出循环并停止编码。

## 1.3 霍夫曼编码

霍夫曼于1952年提出了霍夫曼编码<sup>[7-8]</sup>,它完全依据字符出现概率来构造平均长度最短的异字头变长码字。霍夫曼编码理论基于如下定理:在变长编码中,若各码字长度严格按照所对应符号出现概率的大小逆序排列,则平均长度最小。在计算机信息处理中,霍夫曼编码是一种一致性编码法(又称为熵编码),用于数据的无损压缩<sup>[9]</sup>。

编码的基本方法是对于出现概率或频率较高的信息赋予较短的字长,对于出现概率或频率较低的信息赋予较长的字长。霍夫曼编码实现步骤<sup>[7]</sup>为:

1) 将信源符号出现概率按减小的顺序排列;  
2) 将2个最小的概率进行组合相加,并继续这一步骤,始终将较高的概率分支放在上部,直到概率达到1.0为止;

3) 对每对组合中的上边一个指定为1,下边一个指定为0(或相反:对上边一个指定为0,下边一个指定为1);

4) 画出由每个信源符号概率到1,0处的路径,记下沿路径的1和0;

5) 对于每个信源符号都写出1,0序列,则从后到前就得到霍夫曼编码。

整个压缩编码算法流程如图2所示。

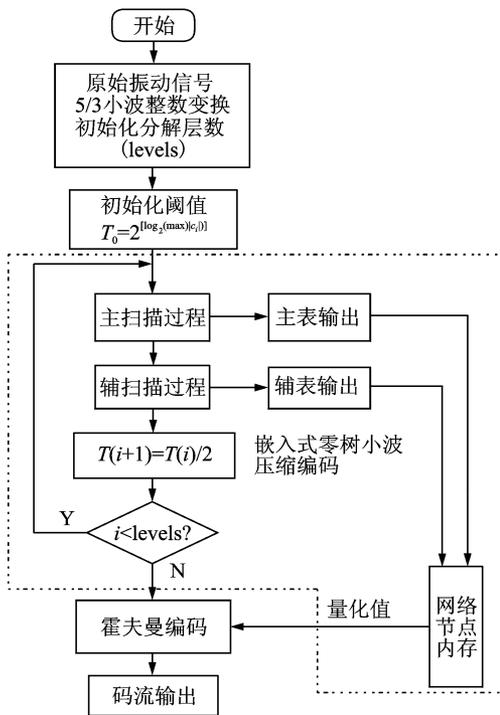


图2 压缩编码算法流程图

## 2 压缩性能评价标准

信号压缩比CR

$$CR = B_s/B_c \quad (6)$$

其中: $B_s$ 为原始信号占用比特数; $B_c$ 为压缩后信号占用比特数。

均方根百分误差PRD

$$PRD = 100 \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x(n) - \hat{x}(n))^2}{\sum_{n=1}^N x(n)^2}} \quad (7)$$

其中: $x(n)$ 为原始信号; $\hat{x}(n)$ 为重构后的信号; $N$ 为点数。

式(6)和式(7)中的CR和PRD是相互制约的,CR越高,PRD就越大,实际应用中应该根据要求折中选取。

## 3 数据压缩编码实验

将该压缩编码算法编程并移植到无线传感器节点的DSP中,进行下述算法验证实验。实验为单通道、无线和有线方式同时采集并传输振动数据,以便于对比分析。采样频率 $f=2\text{ kHz}$ ,采样点数 $N=512$ 。齿轮泵由三相异步电动机带动,电动机转速 $n=1450\text{ r/min}$ ,齿轮泵转频 $f_c=24.2\text{ Hz}$ ,齿数 $z=6$ ,啮合频率 $f_m=145.2\text{ Hz}$ 。无线传感器节点主要包括DSP、单片机、无线模块、供电模块和控制电路。液压系统主要包括三相异步电动机和齿轮泵,振动信号监测点取在齿轮泵外壳上方。

图3为振动信号5/3小波分解时域波形(4层),图4为最大压缩比下的原始振动信号和重构后信号

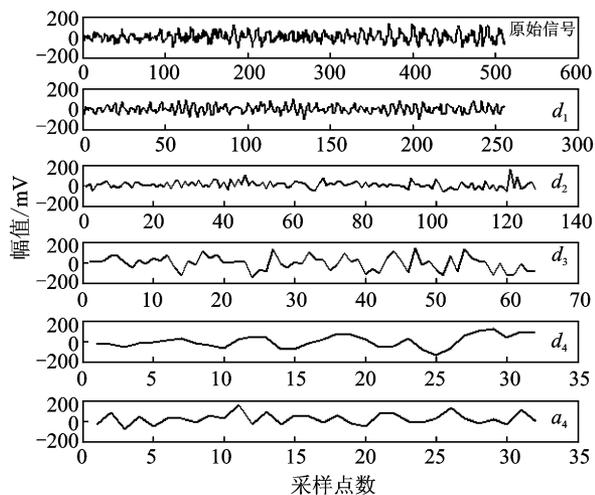


图3 原始振动信号小波分解

的时频图(图中信号幅值为采样值,没有经过灵敏度换算,真实振动信号应为加速度)。实验时,将加速度传感器输出信号分为两路,一路连接至工控机采集卡,进行有线采样,为原始振动信号;另一路连接至无线传感器节点,通过无线传输送至基站,再由上位机获取,解码、解压缩和重构,为重构信号。传感器节点DSP程序设置如下:小波分解层数为4,初始阈值 $T_0=2^{\lceil \log_2(\max |c_i|) \rceil}$ 。经过对原始振动信号和重构振动信号的Matlab仿真计算,振动信号压缩比 $CR=9.5$ ,均方根百分误差 $PRD=74.88$ 。

由图4可以看出,在如此高的压缩比下,时域信号有较大损失。从频域来看,原始信号高频部分被滤除,齿轮泵转频2倍频、啮合频率这些特征信息依然

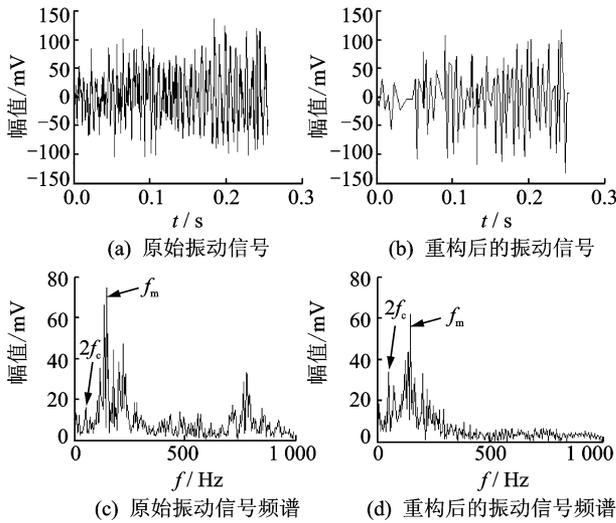


图4 原始信号和重构后的信号及其频谱

保留。由于信号处理过程中存在误差,故重构后信号时频图幅值有所变化。

表1为图4原始振动数据最终经过霍夫曼编码后的码表。表2为数据表,表2中保存着每个数据的位置信息及其霍夫曼编码。经过一系列的小波分解、量化和编码过程,振动数据被这些“1”,“0”二进制码所替代,最终只需要传输表1和表2即可。原始振动数据大小为512Byte,经过编码后只需传输54Byte。由此可见,和直接传输振动数据相比,其数据量大为减少,数据传输也较易实现,并节省了上位机存储空间。

表1 霍夫曼码表

表征量	霍夫曼码
37.778 125 0	[1,1,0,0,1,0]
18.889 062 5	[1,1,0,0,1,1]
-18.889 062 5	[1,1,0,0,0,0]
-13.492 187 5	[1,1,0,0,0,1]
-151.112 500 0	[1,1,1,1,1,1]
-37.778 125 0	[1,1,1,0,0,0]
13.492 187 5	[1,1,1,0,0,1]
151.112 500 0	[0,0,1,0,0]
26.984 375 0	[0,0,1,1,0]
-53.968 750 0	[1,1,0,1,0]
-75.556 250 0	[0,0,0,0,0]
107.937 500 0	[0,0,1,0,0]
-107.937 500 0	[1,0,0,0,0]

振动信号的压缩效率和小波分解层数、初始阈值的选取有关,不同的分解层数和初始阈值对压缩结果影响较大。分解层数越多,计算量越大,这将增加CPU的运算负担;初始阈值越大,每次扫描后留下来的小波系数越少,压缩比越大,重构信号的误差

表2 数据表

位置	霍夫曼码	位置	霍夫曼码
57	[1,1,1,1,1]	111	[0,0,1,0,0]
60	[0,1,0,0,0]	115	[1,0,0,0,0]
61	[0,1,0,0,0]	118	[0,0,1,0,0]
63	[0,1,0,0,0]	122	[1,0,0,0,0]
78	[1,0,0,0,0]	124	[1,0,0,0,0]
81	[0,1,0,0,0]	125	[1,0,0,0,0]
88	[1,1,1,1,1]	127	[1,0,0,0,0]
90	[1,0,0,0,0]	174	[0,0,1,0,0]
91	[0,1,0,0,0]	249	[0,0,1,0,0]
96	[0,1,0,0,0]	319	[0,0,1,0,0]
101	[0,1,0,0,0]	384	[0,0,1,0,0]
104	[1,0,0,0,0]	390	[1,0,0,0,0]
106	[1,0,0,0,0]	460	[1,0,0,0,0]
108	[0,1,0,0,0]	35	[1,1,0,0,1]
110	[1,0,0,0,0]	41	[1,1,0,0,1]

也越大。为了说明此问题,将初始阈值 $T_0$ (实验中为1)加权重 $\omega$ ( $0 \sim 1$ ),对上述原始振动信号在不同情况下进行压缩编码(Matlab仿真),分析不同阈值和小波分解层数情况下,CR,PRD、阈值及小波分解层数之间的关系如图5所示。其中: $T_c = \omega T_0$ ;  $\omega$ 为权重,取值 $0 \sim 1$ ;  $T_0$ 为初始阈值。

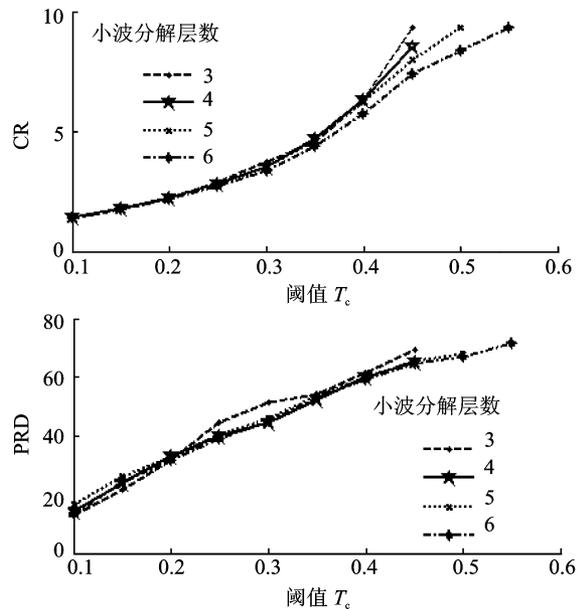


图5 CR和PRD随阈值和小波分解层数的变化关系

由图5可以看出,CR和PRD均随着阈值的增大而增大;权重 $\omega$ 在 $0.1 \sim 0.4$ 之间,不同小波层数下CR变化趋势几乎一致; $\omega > 0.4$ 时,随着小波分解层数的增加,CR变化趋势趋缓。PRD和小波层数之间没有明确关系,3层分解时PRD波动较大;4层分解时PRD值波动范围在5层分解和6层分解之间;

分解层数越多,计算量增加,CPU 负担越重。

小波分解层数和初始阈值的选取原则如下。

1) 通过适当的软、硬件设计,DSP 中的小波分解层数、初始阈值可以在上位机软件上设置与实时修改。

2) 节点处理器 DSP 为 TI TMS320F2812 32 位处理器,8 通道 12 位 AD,采样频率高达 150 k,外扩的 512 k SRAM 用来存储数据。针对本次实验,512Byte 数据、4 层小波分解效果最好,压缩比和均方根百分误差能达到较好的折中。建议小波分解层数在 3~6 之间选择,如果太大,CPU 负担太重,传感器节点响应时间会有较大延迟。

3) 为了验证本算法的最高有效压缩程度,本研究中初始阈值选为  $T_0 = 2^{\lceil \log_2(\max |c_i|) \rceil}$ ,是 5/3 小波分解后小波系数的最大绝对值。实际操作中,可采用“凑试法”,即初步选取小波系数最大绝对值的 1/2,然后视信号压缩效果(时、频特征、CR 和 PRD)上、下调节即可。初始阈值越大,CR 越大,信号高频部分留下来的越少;反之,信号高频部分留下来的越多。

4) 压缩编码算法对高频信号进行了“滤波”处理,通过修改初始阈值,其“滤波”效果是可控的。

## 4 结 论

1) 对齿轮泵振动信号的压缩编码实验表明,本算法在保留信号主要频域特征的前提下,压缩效率高(压缩比高达 9.5),节点只需传输霍夫曼码表和数据表即可,大大减少了传输数据量,节省了有限的无线传感器网络节点资源和上位机存储空间。

2) 初始阈值和小波分解层数对振动信号的压缩效率影响较大。CR 和 PRD 随着阈值的增大而增大,不同的小波分解层数对 CR 和 PRD 也有影响。实验表明,小波分解层数选为 4,初始阈值选为最大小波系数绝对值,不仅可将振动数据压缩 9.5 倍,且不丢失其频域主要特征。

3) 实际应用中,小波分解层数宜在 3~6 之间选择。初始阈值的选择可采用“凑试法”,即初步选取最大的小波系数绝对值的 1/2,然后视信号压缩效果(时、频特征、CR 和 PRD)上、下调节即可。

## 参 考 文 献

[1] 董辉,卢建刚,孙优贤. 无线传感器网络中分布式小波压缩[J]. 传感技术学报,2007,20(11):2481-2486.

Dong Hui, Lu Jiangang, Sun Youxian. Distributed wavelet compression in wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(11):2481-2486. (in Chinese)

[2] 闫常友,杨奇逊,刘万顺. 基于提升格式的实时数据压缩和重构算法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(9):6-10.

Yan Changyou, Yang Qixun, Liu Wanshun. A real-time data compression & reconstruction method based on lifting scheme [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9):6-10. (in Chinese)

[3] 段晨东,何正嘉. 基于第二代小波变换的转子碰摩故障特征提取方法[J]. 汽轮机技术,2006,48(1):34-39.

Duan Chendong, He Zhengjia [J]. Feature extraction approach for rotor rub-impact using second generation wavelet transform[J]. Turbine Technology, 2006, 48(1):34-39. (in Chinese)

[4] Shapiro J M. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12):3445-3462.

[5] 张波. 基于提升小波的医学数据压缩算法及 DSP 实现[D]. 天津:天津大学,2006.

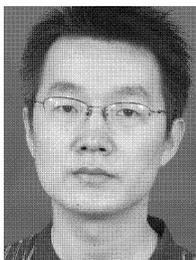
[6] 路森. 基于小波变换的脑电信号压缩算法研究[D]. 济南:山东大学,2005.

[7] 寇鹏. 心电信号压缩方法研究及其 DSP 系统实现[D]. 北京:北京工业大学,2004.

[8] Huffman D A. Associate I. A method for the construction of minimum-redundancy codes[J]. Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 1952, 40(9):1908-1910.

[9] 时国平. 关于霍夫曼编码数据压缩效果[J]. 池州学院学报,2008,22(5):46-48.

Shi Guoping. The compression effect of Huffman coding data algorithm [J]. Journal of Chizhou College, 2008, 22(5):46-48. (in Chinese)



**第一作者简介:**王楠,男,1983 年 12 月生,博士研究生。主要研究方向为无线传感器网络测量技术及应用、机械状态监测和故障诊断。曾发表《Research on linear wireless sensor networks used for online monitoring of rolling bearing in freight train》(《Journal of Physics: Conference Series》2011, Vol. 305, No. 1)等论文。

E-mail:heroyou@126.com