

# 基于嵌入式Linux的电能质量在线检测研究

苏晓东

(哈尔滨商业大学 哈尔滨 150028)

摘要 测量和分析电能质量指标的检测装置是电力用户非常关切的设备 本文采用小波变换分析理论作为电能质量检测和分析的方法 基于嵌入式Linux系统 以DSP器件为核心研究设计了电能质量在线检测装置。通过仿真及实验 验证了对于各种电能质量问题本系统所给出的检测方法的正确性。

关键词 电能质量 ;小波 ;DSP ;嵌入式Linux

中图分类号 :TM933

文献标识码 :B

文章编号 :1001- 1390(2009)07- 0032- 06

## The Study of Power Quality Online Measurement Based on Embedded Linux

SU Xiao- dong

(Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

**Abstract** :The equipment of power quality measurement and analysis is the one which is deeply concerned by power users. In this article the design approach of power quality online measurement device with DSP as core apparatus is studied, the analysis method of power quality is based on embedded Linux system and the theory of Wavelet- transform. The detection methods of different kinds of power quality problem are validated by emulator.

**Key words** power quality, wavelet, DSP, Linux

### 0 引言

随着非线性负荷及冲击性负荷的增加 ,以及新型的带处理器或电力电子器件的设备对电能质量要求的不断提高 ,电能质量问题已经日渐突出。电能作为一种商品 ,消费者需要及时地了解产品的质量 ,并有可能对供电企业提出电能质量的具体要求 ,因此电能质量的检测至关重要。

国外公司的电能质量检测产品多是采用DSP技术 ,功能多样 ,但价格昂贵。我国对电能质量检测仪器的研制相对落后 ,大多仍采用单片机或工控机结构 ,性能单一、通用性和扩展性差 ;国内对电能质量的检测也还没有做到实时地在线检测。随着科技的发展 ,尤其是网络、通信和数字信号处理技术 ,以及大规模集成电路的快速发展 ,研制新型高精度电能质量检测仪器的条件已经具备。同时 ,随着嵌入式Linux技术的成熟和16/32位RISC(精简指令集计算机)的ARM处理器的快速发展 ,嵌入式技术已经成为电能质量检测仪器发展的一个崭新方向<sup>[1]</sup>。

研制高精度在线电能质量检测系统需要解决的理论和技术问题很多 ,其中电能质量评价、谐波与间

谐波检测算法、DSP电路和嵌入式技术是关键性问题。本文以小波变换算法为检测理论基础 ,集成DSP和嵌入式Linux技术 ,研究了高精度嵌入式电能质量检测系统的设计方案。

### 1 电能质量检测原理

#### 1.1 稳态电能信号检测

##### (1)频率偏差质量检测

电力系统在正常运行条件下 ,频率的实际值与标称值之差为频率偏差 ,电力系统的频率变化是指基波频率偏离正常值的现象。通常用频率变动和频率偏差描述电力系统的频率变化情况。

频率变动 :

$$\Delta f_1 = f_{m1} - f_{m2} \tag{1}$$

式中 $f_{m1}$ 为频率的某个极大值或极小值  $f_{m2}$ 为与 $f_{m1}$ 相邻的极小值或极大值。

频率偏差 :

$$\Delta f_2 = f - f_N \tag{2}$$

式中 $f_{m1}$ 为实际频率  $f_N$ 为标称频率。

相对频率变动 :

$$\frac{\Delta f_1}{f_N} = \frac{f_{m1} - f_{m2}}{f_N} \times 100\% \quad (3)$$

相对频率偏差：

$$\frac{\Delta f_2}{f_N} = \frac{f - f_N}{f_N} \times 100\% \quad (4)$$

### (2) 电压偏差质量检测

供电系统在正常运行时，某一节点的实际电压与标称电压之差对标称电压的百分比被称为该节点电压偏差：

$$\Delta U = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (5)$$

式中  $\Delta U$  为电压偏差； $U$  为实际电压(kV)； $U_N$  为系统标称电压(kV)。

电压偏差属于电压变动的范畴。与同属电压变动范畴的过电压和欠电压相比，电压偏差是仅仅针对电力系统正常运行情况而言的。

系统在非正常运行方式下，由故障所引发的电压变动与故障点距离的远近有较大关系。此时，实际电压可能严重偏离标称值，也可能偏离标称值的幅度并不大。电压偏差强调的是实际电压偏离标称电压的数值。而过电压和欠电压强调的是实际电压严重偏离标称电压，并分别为高于标称电压的110%和维持在标称电压的10%~90%，并且持续时间超过1min。

电压合格率是指实际运行电压在允许电压偏差范围内的累计时间与对应的总运行时间的百分比：

$$\text{电压合格率} = \frac{\text{电压合格时间}}{\text{电压监测总时间}} \times 100\% \quad (6)$$

### (3) 谐波与间谐波检测

谐波是周期性电气量的正弦波分量，其频率为基波频率的整数倍。频率不为基波频率整数倍的谐波分量又称间谐波。运用傅立叶变换理论可以完成谐波的测量和分析，傅立叶变换的实质是把被检测的信号分解成许多不同频率的正弦波的叠加，由此对各次谐波分量进行分析。模拟信号经采样，离散成数字序列信号后，作快速傅立叶变换实现对谐波的分析 and 计算，得到基波和各次谐波的幅值和相位，并可获得谐波的功率、阻抗等多项信息。

该方法检测精度高、实现简单、功能多且使用方便，在频谱分析和谐波检测方面都得到广泛应用，但计算量大，因而实时性不好。对于非整数次谐波的检测有频谱泄漏和栅栏现象的缺点，对此我们利用加窗插值算法对快速傅立叶算法进行改进。我们选择组合函数窗，基于余弦函数的组合窗函数可以表示为：

$$W(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{h=0}^M a_h \cos \frac{2\pi n h}{N} \quad (7)$$

式中  $N$  为一个周期采样数据个数  $n=0 \sim N-1$ 。组合窗函数取观测时间为信号周期的整数倍，其频谱在各次整数倍谐波频率处幅值为零，因而谐波之间不发生相互泄露，所以它可以减小频谱泄露，提高检测精度<sup>[2]</sup>。

### (4) 三相电压不平衡检测

按照对称分量法，三相系统中的电量分解为正序、负序和零序三个对称分量。电力系统在正常运行情况下，负序分量有效值与正序分量有效值之比被定义为该电量的三相不平衡度：

$$\varepsilon_U = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (8)$$

$$\varepsilon_I = \frac{I_2}{I_1} \times 100\% \quad (9)$$

式中  $\varepsilon_U$ 、 $\varepsilon_I$  为三相电压不平衡度和三相电流不平衡度； $U_1$ 、 $U_2$  为电压正序、负序分量有效值(kV)； $I_1$ 、 $I_2$  为电流正序、负序分量有效值(kA)。

要计算三相系统的不平衡度，必须首先计算三相系统的正序和负序分量。只有测出各相电量的大小及相位，才能按照对称分量法算出三相不平衡度，比较繁琐。

在实际工作中，往往只知道三相电量的数值。在不含零序分量的三相系统中，根据三相电量  $a$ 、 $b$ 、 $c$ ，可由下式求出三相不平衡度：

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3-6L}}{1 + \sqrt{3-6L}}} \times 100\% \quad (10)$$

$$L = \frac{a^4 + b^4 + c^4}{(a^2 + b^2 + c^2)^2} \quad (11)$$

式中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为三相电压或电流有效值。

### (5) 电压波动和闪变检测

电压波动为一系列电压变动或连续的电压偏差。电压波动值为电压均方根值的两个极值  $U_{\max}$  和  $U_{\min}$  之差  $\Delta U$ ，常以其标称电压  $U_N$  的百分数表示其相对百分比：

$$d = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\% \quad (12)$$

要对电压波动与闪变进行有效的检测，首要任务就是要准确地提取出波动信号。通常将波动电压看成是以工频额定电压为载波，幅度受频率范围在 0.05~35Hz 的电压波动分量调制的调幅波，即：

$$u(t) = A \left[ 1 + \sum_{i=1}^n m_i \cos(\theta_i t + \varphi_i) \right] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (13)$$

式中  $A$  为电网电压的幅值  $m_i$  为第  $i$  个调幅波的幅值  $\theta_i$  为第  $i$  个调幅波的角频率  $\varphi_i$  为第  $i$  个调幅波的初相角 ;  $\omega_0$  为电网基波电压的角频率  $\varphi_0$  为基波电压的初相角。

### 1.2 暂态电能信号检测

暂态电能质量检测是针对电能信号突变的检测, 依靠分析信号中的奇异点及不规则的突变获得有关信息。小波分析是时频分析的重要工具, 它克服了傅立叶分析在频域完全局部化而在时域完全无局部化的缺点, 尤其适合突变信号的分析与处理。它在频域和时域同时具有局部性, 因而能算出某一特定时间的频率分布, 并将各种不同频率组成的频谱信号分解成不同频率的信号块, 使得小波变换更适用于非平稳信号的时频分析<sup>[3]</sup>。

小波变换是以一族函数去表示和逼近一个信号或函数, 即将时间信号展开为这一簇函数的线性叠加。这一簇函数被称为小波函数族, 它是通过一个基本小波函数的不同尺度的平移和伸缩构成的。

将基本小波  $\Psi(t)$  进行伸缩和平移, 令时间轴尺度伸缩参数为  $a$ , 时间平移参数为  $b$ ,  $1/(a)^{1/2}$  为归一化因子, 使不同尺度的小波保持相等的能量。经过平移伸缩后的函数族  $\Psi_{a,b}(t)$  为:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a \in R^+, b \in R \quad (14)$$

此函数族是由同一母函数  $\Psi(t)$  经伸缩和平移而得到的一组函数。

对于暂态电能质量检测与定位我们采用离散正交小波变换, 该方法实现简单、效率高, 克服了连续小波变换的缺点。对于各种暂态电能信号, 在发生时刻和结束时刻电压波形中都会出现一个微小的突变, 通过小波变换可将这个微小的突变放大而被显示出来, 检测出这一突变, 即可检测出暂态电能信号的持续时间和幅值, 实现故障的定位。其暂态电能信号检测和定位流程如图1所示。

#### (1) 降低噪声影响

电能信号总会受各种噪声的影响, 小波变换是线

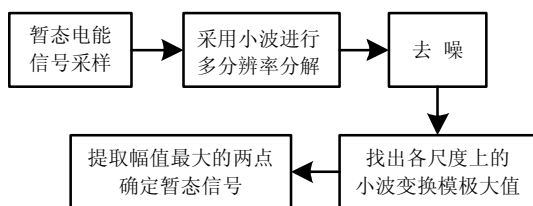


图1 暂态电能信号检测和定位流程

Fig.1 Flow chart of measuring and positioning of transient electric power signal

性变换, 被检数据的小波变换值是真实数据和噪声数据的小波变换值的线性叠加。这样, 小波变换的模极大值有可能是由噪声信号所产生的。对于实际信号, 仅利用小波变换模极大值检测奇异点, 就可能产生较大的误差。因此, 必须对信号做去噪处理, 既要消除噪声所引起的高频量, 又要保留那些反映信号突变部分的高频量。

利用小波变换去噪, 就是利用它能较好地表现局部结构的特点, 通过电能质量暂态信号产生的小波系数在不同尺度上的相关性与噪声在不同尺度上的非相关性来抑制噪声成份。小波变换将频带进行多层次划分, 对小波变换中没有细分的高频部分进一步分解, 并根据被分析信号的特征, 自适应地选择相应频带, 使之与信号频谱相匹配, 从而提高时频分辨率。

含有噪声的一维信号的模型可以写成如下形式:

$$s(t) = f(t) + \sigma \cdot e(t) \quad i=1, 2, \dots, n-1 \quad (15)$$

式中  $f(i)$  为真实信号  $e(i)$  为高斯白噪声。

首先对信号  $s$  进行小波分解, 则噪声分量通常包含在高频成份中, 因而可以用门限阈值等形式对小波系数进行处理, 达到去噪的目的。用小波去噪较好地保存了原信号中的高频突变部分, 具有低通滤波器不具有的优点。

#### (2) 扰动的开始时刻检测

信号突变的主要特征是信号在时间和空间上存在着局部的变化, 利用小波变换可以检测到信号是否发生突变。可以选择 db8 小波对突变信号进行分析, 并对信号的频带进行正确的划分和确定小波的分解层数。并尽量使信号的基频位于最低子频带的中心, 以限制基频分量对其他子频带的影响。

#### (3) 幅度与频率特征检测

小波变换的多分辨率分析方法为检测原始信号中的每个谱段的信号分量成份提供了手段, 我们采用 db 小波基对原始信号进行小波变换的多分辨率分析, 不仅可以求出每个频谱段的频率范围, 而且通过小波逆变换可以求出每个频谱段的信号成份。

#### (a) 振荡暂态测量和脉冲暂态测量

由于暂态振荡主要产生高频信息, 需要高频特性好的小波函数, 可以应用 db24 小波对其进行多级分解, 得到不同频段的高频成份。分析出暂态振荡发生的准确时刻, 衰减延续的时间, 以及振荡干扰的幅度, 判断出振荡的频率范围。脉冲暂态测量也可以选择 db24 小波。

#### (b) 短时电压变动测量

短时电压变动信号除了发生点和终止点外, 各段

时间信号都是连续的,且为基波频率。因此,在高频各尺度上只有突变点处有信息。短时电压变动的特点是,当噪声影响严重时,奇异性可能被噪声湮没,尤其当扰动发生或终止在工频相角为0或 $\pi$ 附近时,采样信号几乎连续为零,此时即使噪声很小,也可能检测不到,因此短时电压变动检测更需要关注噪声问题。可以采用db1小波提取采样信号的低频系数作为扰动分类的依据,以避免噪声的影响。

## 2 电能质量检测系统

### 2.1 工作原理和系统设计

三相电压电流采样信号经互感器输入到电能质量检测系统,再经过信号调理电路后,由A/D转换器和DSP对各相电流、电压进行高速实时采集和处理,由DSP完成对基本电量参数、谐波、波动、闪变及不平衡度等的测量和分析工作。上位机通过DSP的HPI接口,高速访问DSP的整个存储空间,完成对DSP数据的统计、分析、存储、显示和人机交互以及完成与主控台的通信。系统结构如图2所示。

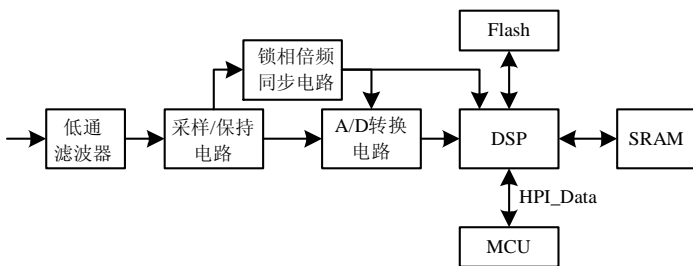


图2 系统结构框图

Fig.2 System structure diagram

#### (1) DSP检测流程

三相电压、电流采样信号在A/D转换结束后产生一个中断信号以通知DSP读取数据,DSP通过地址选择相应的A/D芯片及通道,读取16位数据。DSP通过32bit高性能外部存储器接口EMIF直接访问片外高速数据存储器 and 程序存储器,其地址分配由可编程逻辑阵列CPLD决定。处理流程如图3所示。

#### (2) 基本硬件和软件环境选型

随着32位嵌入式CPU价格的下降和性能指标的提高,嵌入式系统得到了迅速发展。嵌入式系统是一种专用的、控制特定设备的计算机系统。它的基本组成为嵌入式微处理器、嵌入式操作系统和在其上开发的应用程序三部分。嵌入式微处理器是系统的核心,是嵌入式操作系统和开发应用程序的硬件平台<sup>[4]</sup>。

(a) DSP 模块。可以选择美国 TI 公司的 TMS320C6711DZDP200 等作为系统的嵌入式微处理器。该芯片具有高速浮点运算能力和类似RISC的指

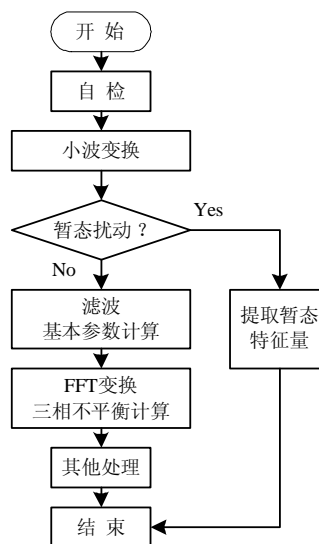


图3 DSP数据处理流程

Fig.3 DSP data processing flow

令集。内核先进,8个独立的功能单元,6个ALU,2个乘法器,浮点支持单精度和双精度浮点运算,可以每周执行8条32bit指令,带有32个32bit通用寄存器。片内集成64K RAM,32bit高性能外部存储器接口提供了与SDRAM,FLASH等同步/异步存储器的直接接口,并提供多种集成外设等。

(b) MCU模块。可以选择PC104总线系统等作为系统的计算测控平台。PC104总线系统的开发平台与现有的其它通用计算机系统完全相同,现有的开发软件均可以使用,也可以使用通用计算机来开发测控系统的应用程序。PC104嵌入式微机采用CMOS技术,超大规模集成技术和表面封装技术使其体积更小、功耗更低。

(c) 嵌入式Linux操作系统。嵌入式Linux是指通过对Linux操作系统进行裁剪和改修,能在嵌入式计算机系统上运行的一种操作系统。它以丰富的开放源代码资源为支撑,内核小而灵活,功能强大,易于裁剪,性能稳定高效;支持多任务、多种硬件平台和多种文件系统,网络通信功能完善,GUI界面友好,驱动丰富。

在设计嵌入式系统时,首先需要建立嵌入式Linux操作系统,通常分为以下四个步骤:BOOTLOADER移植,为Linux的引导做准备;根据业务需求和硬件配置裁剪和移植Linux内核;开发驱动程序,包括:网络驱动、串口驱动、USB驱动、键盘驱动、显示驱动和HPI驱动等;建立文件系统。

### 2.2 应用软件开发

根据业务需求和嵌入式系统的要求,遵循适用性、稳定性、可扩展性和可复用性相结合的原则,电能质量检测系统应用软件架构可分为用户层、应用服务

层、数据层三层,如图4所示。



图 4 应用软件架构及子系统结构设计图

Fig.4 Application software frame and subsystem structure chart

其中,数据层共完成系统的5个基本数据流:

(1)起始状态-MCU上电-进入参数设置-保存系统参数到参数文件中-系统初始化参数-为子系统提供参数资源;

(2)用户操作-获取操作对象类型指令-提出相应显示内容-返回工作界面显示;

(3)主台操作-分析指令类型-获取相应的数据-返回主台系统;

(4)读DSP进程-根据DSP数据存储的规则读取DSP部分数据-处理数据到DSP数据共享内存;

(5)业务数据处理-根据业务类型提出相关数据-分析管理各种数据通信-分发相应处理数据。

### 2.2.1 应用服务层的软件子系统设计

根据业务需求和模块化开发的原则,电能质量检测系统共设计了4个软件子系统,如图4所示。

(1)显示子系统。完成用户和电能质量检测的显示交互,主要包括参数设置交互、基本电量显示、电能质量显示、事件显示、系统自检信息显示以及与应用业务处理子系统的通信处理等。

(2)初始化和参数设置子系统。主要完成MCU和应用系统的初始化工作以及对系统进行各种参数设置工作,主要是通过共享内存和消息队列的方式向业务处理子系统提供各种标准参数和进行相关的参数设置工作。

(3)应用业务处理子系统。主要用来处理各项业务,其中主要包括统计分析处理、数据存储与删除、数据查询、数据通信处理、系统管理、掉电处理等。

(4)DSP数据读写子系统。主要完成对DSP的所有读写操作,具体操作主要包括DSP参数设置、DSP通信与管理、DSP实时数据读取、DSP录波数据读取等。

### 2.2.2 用户图形界面开发

用户图形界面(GUI- Graphics User Interface)是操作系统与用户之间的交互接口。嵌入式GUI要求简

单、直观、占用资源小且反应快速,以适应系统硬件资源有限的条件。并且具有高度的可移植性与可裁减性,以适应不同的硬件条件和业务需求。

目前比较成熟的嵌入式GUI软件有Microwindows,MiniGUI,Qt/Embedded等。我们采用Qt/Embedded进行GUI开发。Qt/Embedded是著名的Trolltech公司发布的嵌入式GUI应用开发工具,全部的C++图形界面。它继承了Qt的全部标准API,提供了比Xlib和XWindows系统更加紧凑的窗口生成系统,对FrameBuffer直接进行操作,完全模块化的设计和高效的编译系统减少了内存的消耗。利用Qt编写的程序可以在Linux和Windows环境下运行。

电能质量检测系统的GUI子系统直接与业务处理模块进行数据交换。为了保证模块之间的低耦合、高聚合性,GUI子系统与业务处理模块之间采用类似客户端/服务器的方式进行通信,如图5所示。

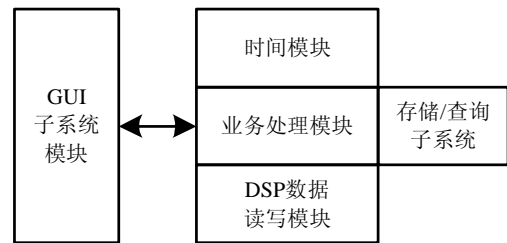


图 5 软件模块

Fig.5 Software module

GUI子系统除图形界面功能外,还兼有基本的数据处理与网络通信功能。GUI子系统是一个独立的可执行程序,与外部数据交换采用统一的预定义协议与接口;电能质量检测系统是一个分布式系统,GUI子系统必须具有网络通信能力;分布式网络环境是由PC机、服务器、基于ARM或PowerPC的嵌入式计算机等组成的,GUI子系统在不同的计算机上应该有同样的外观和交互能力,即必须具有跨平台能力。

### 3 结束语

本文根据各种电能质量问题的不同特性给出了相应的检测方法,对于暂态和非平稳电能信号的分析,本文给出了小波变换方法。并基于嵌入式Linux操作系统、Qt/Embedded用户图形界面开发工具和DSP,给出了嵌入式在线电能质量检测系统的设计路线。

### 参考文献

[1] 逯培兵.基于嵌入式技术的电能质量检测研究[EB/OL].中国优秀硕士学位论文全文数据库,2008-10-30.  
LU Pei-bing. The Research of Power Quality Detection Based on Embedded Technique [EB/OL]. The full text of China outstanding master's dissertation

database, 2008- 10- 30.

[2] 梅永,王柏林. 电力系统信号采集与谐波测量方法[J]. 电测与仪表, 2008,45(9).

MEI Yong, WANG Bo- lin. Signal acquisition and measurement methods for harmonics in power systems [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008,45(9).

[3] 解蕾,解大,张延迟. 新型电能质量表的算法及实现[J]. 电测与仪表, 2008,45(9).

XIE Lei, XIE Da, ZHANG Yan- chi. The algorithm and realization of the new type meter measuring power quality [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008,45(9).

[4] 宋惠忠,俞建军,罗耀强. 一种基于网络化的新型电能质量综合监测系统的实现[J]. 电力设备, 2008,9(4).

SONG Hui- zhong, YU Jian- jun, LUO Yao- qiang. Realization on a kind of

New Comprehensive Inspection System of Electric Energy Quality Based on Network- Oriented[J]. Electrical Equipment, 2008,9(4).

[5] 高超然. 电能质量监测仪中基于Qt/Embedded的图形用户系统研究与实现[EB/OL]. 中国优秀硕士学位论文全文数据库, 2005- 09- 27.

GAO Chao- ran. The Research and Implementation of Graphic User System Based on Qt/Embedded in Power Quality Monitoring Instrument [EB/OL]. The full text of China outstanding master's dissertation database, 2005- 09- 27.

作者简介:

苏晓东(1965- ) 男, 汉族, 哈尔滨市人, 硕士/副教授, 就职于哈尔滨商业大学, 从事信息与通信系统的研究和教学。Email: hsdxd@163.com

收稿日期 2009- 01- 10

(杨长江 编发)

(上接第 5 页)

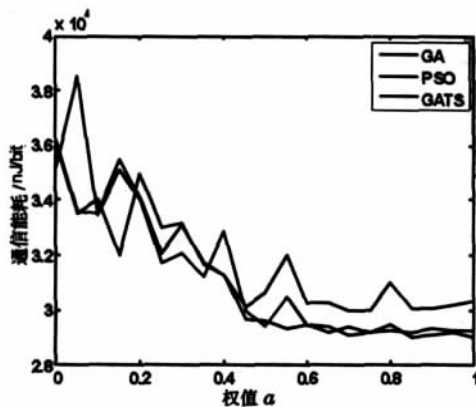


图12 采用不同权值 $\alpha$ 时通信能耗变化

Fig.12 The change of communication energy with different parameter  $\alpha$

数中通信能耗指标权重较大时, GATS得到的通信能耗指标比GA要好, 与PSO接近。结果说明使用GATS能得到更好的优化结果, 网络覆盖率增大, 通信能耗降低。

### 3 结论

无线传感网络节点能效性测量优化能提高网络测量覆盖率, 降低网络通信能耗。针对节点能效性测量优化问题的特点, 本文提出一种遗传- 禁忌搜索混合算法, 利用禁忌搜索算法的“记忆性”改进遗传算法, 增强遗传算法的全局搜索能力。采用遗传- 禁忌搜索算法, 对网络测量覆盖率和网络通信能耗指标进行节点能效性测量优化。仿真实验表明, 遗传- 禁忌搜索算法能快速有效实现节点能效性测量优化, 达到全局最优。利用遗传- 禁忌搜索算法优化的网络测量覆盖率比利用遗传算法优化的网络测量覆盖率提高3.1%, 网络通信能耗降低4.0%。

### 参 考 文 献

[1] I.F. Akyildiz, W.Su. Wireless sensor networks: a survey. Computer Networks, 2002, 38:393- 422.

[2] Nojeong Heo and Pramod K. Varshney, Energy- efficient deployment of intelligent mobile sensor networks, 2005, IEEE transactions on systems, man, and cybernetics- part A: systems and humans, vol.35, NO.1.

[3] Ping Song, Jize Li, Kejie li and Li Sui. Researching on Optimal Distribution of Mobile Nodes in Wireless Sensor Networks being Deployed Randomly. International Conference on Computer Science and Information Technology, 2008: 322- 326.

[4] Srinivas, M. and Patnaik, L.M. Genetic algorithms: a survey, 1994, Computer, vol.27, issue: 6, 17- 26.

[5] ESTRIN D. Tutorial Wireless Sensor Networks Part IV: Sensor Network Protocols[R]. MobiCom, 2002.

[6] Xue Wang, Junjie Ma, Sheng Wang. Collaborative deployment optimization and dynamic power management in wireless sensor networks. In: Proceedings of International Conference on Grid and Cooperative Computing, 2006: 121- 128.

[7] ESTRIN D. Tutorial Wireless Sensor Networks Part IV: Sensor Network Protocols[R]. MobiCom, 2002.

[8] 王雪. 无线传感网络测量系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 1- 23.

[9] 王雪. 测试智能信息处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 161- 243.

[10] Glover F, Kelly J, Laguna M. Genetic algorithm and tabu search: hybrids for optimization [J]. Comput & Opsres, 1995, 22(1): 111- 134.

作者简介:

王勇(1987- ) 男, 汉族, 湖南岳阳人, 硕士, 研究方向为无线传感网络能效性问题。Email: yong- wang04@mails.tsinghua.edu.cn

王雪(1963- ) 男, 汉族, 哈尔滨人, 博士/教授, 博士生导师, 研究方向为智能仪器与数据融合和传感网络。Email: wangxue@mail.tsinghua.edu.cn

孙欣尧(1987- ) 男, 汉族, 北京人, 本科, 研究方向为无线传感网络压缩测量问题。Email: sx05@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期 2009- 04- 09

(常会敏 编发)