

自适应滤波 RLS 算法研究与 DSP 实现

许国威,马胜前,危淑平

(西北师范大学 物理与电子工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:自适应滤波器一直是随机信号处理其中的一个重要的研究课题,可以不需要预先知道给定信号及噪声的自相关函数,它可以利用前一时刻已获得的滤波器参数自动地调节现时刻的滤波器参数,从而实现最佳滤波。研究了自适应滤波器的基本结构和自适应滤波递推最小二乘(RLS)算法在 DSP 上的实现,采用定点 TMS320VC5416 DSP 为平台,通过 C 语言设计了一个 RLS 算法的 16 阶自适应滤波器,在 CCS 环境下进行仿真结果查看,并通过与 MATLAB 进行仿真比较。实验结果表明,该滤波器有效、性能良好,实现了较好的滤波功能,在数字信号处理领域有很好的应用价值。

关键词:自适应滤波器;递推最小二乘算法;数字信号处理

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2010)10-0035-04

Research to RLS Algorithm of Adaptive Filter and Its DSP Realization

XU Guo-wei, MA Sheng-qian, WEI Shu-ping

(College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Adaptive filtering algorithm always becomes one of the important research topics in the processing of random signal. It is unnecessary to know the self-related function about signal and the noise in the adaptive filter in advance, for it can adjust the filter parameter at current time by using the past parameter to work at its best performance. On the basis of research on the structure of adaptive filter and the basic principles of recursive least square (RLS) algorithm realize on the DSP, and a sixteenth order RLS adaptive filter which is designed in C language on the platform of TMS320VC5416 fixed-point DSP, and the RLS algorithm's simulation results is compared with the software of MATLAB. The simulation results show that the adaptive filter is valid, achieves a better filtering, and has good application value in the field of digital signal processing.

Key words: adaptive filter; recursive least square algorithm; digital signal processing

0 引言

自适应滤波器(Adaptive Filter)是近几十年来发展起来的关于信号处理方法和技术的滤波器,其设计方法对滤波器的性能影响很大。自适应滤波器是相对固定滤波器而言的,它是一种能够自动调整本身参数的特殊维纳滤波器。自适应滤波算法的研究是自适应信号处理中最为活跃的研究课题之一,线性自适应算法又是实际应用最多的。两种最基本的线性滤波算法:最小均方误差(LMS)算法和递推最小二乘(RLS)算法, LMS 算法具有初始收敛速度较慢、执行稳定性差、计算简单、计算量小的特点,可以应用于所有信号领

域。RLS 算法的初始收敛速度比 LMS 算法快一个数量级,执行稳定性好,但是执行计算复杂,计算量大,适用于平稳信号^[1]。

数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP),在实现数字滤波上具有稳定性好、精确度高、不受环境影响、灵活性好等优点^[2,3]。目前不少文献对 LMS 算法及其改进 LMS 算法自适应滤波器的 DSP 实现都有研究,其中具有代表性的有文献^[4~7],但针对 RLS 算法自适应滤波器的 DSP 实现研究不多。文中选用定点 TMS320VC5416 DSP 芯片,完成了 RLS 算法的自适应滤波器的设计,实现了良好的滤波性能,并通过与 MATLAB 设计的滤波器进行仿真比较,验证了所设计 RLS 算法滤波器的有效性。

1 自适应滤波器的结构和算法

1.1 自适应滤波器的结构

自适应滤波器由参数可调的数字滤波器(DF)和

收稿日期:2010-01-14;修回日期:2010-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(20927004);西北师范大学科技创新工程资助项目(NWNU-KJCXGC-03-24)

作者简介:许国威(1983-),男,湖北仙桃人,硕士研究生,研究方向为计算机测量与控制 and 自适应信号处理;马胜前,教授,硕士研究生导师,研究方向为计算机测量与控制 and 自适应信号处理。

自适应算法两部分组成,自适应滤波器原理,如图 1 所示。DF 可以是 FIR 数字滤波器或 IIR 数字滤波器,也可以是格形数字滤波器。输入信号 $x(n)$ 通过 DF 后产生输出信号 $y(n)$,其与参考信号 $d(n)$ 进行比较形成误差信号 $e(n)$,并以此通过某种自适应算法对滤波器参数进行调整,最终使误差信号 $e(n)$ 的均方值达到最小^[8]。

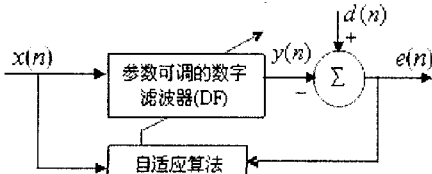


图 1 自适应滤波器原理

1.2 递推最小二乘(RLS)算法

最小二乘(LS)算法是估计理论和系统辨识等领域中的一种基本的自适应滤波和典型有效的数据处理方法。在随机的环境下使用最小二乘法,并不要求提供观测数据的概率统计方面的信息,而用这种方法获得的统计结果却有相对好的统计特性。

递推最小二乘法(Recursive Least Square 简写 RLS)是最小二乘的一类快速算法,是严格以最小二乘方准则为依据的算法。RLS 算法主要应用于系统辨识、自适应控制和自适应信号处理等领域。主要优点是收敛速度快,因此首先在快速信道均衡、实时系统辨识和实际序列分析中得到广泛的应用。其主要缺点时每次迭代计算量大^[9]。

递推最小二乘(RLS)算法是自适应滤波算法中两类最基本的算法之一,基于最小二乘准则,RLS 算法决定自适应滤波器的权系数向量 $W(n)$ 使估计误差的加权平方和 $J(n) = \sum_{i=1}^n \lambda^{n-i} |e(i)|^2$ 最小,其中 λ 为遗忘因子,且 $0 < \lambda \leq 1$ 。递推最小二乘(RLS)算法的设计流程如下^[10]:

(1) 设置初始条件:滤波器长度(M)、遗忘因子(λ)、 $w(0) = 0$ 、 $C(0) = \delta^{-1}I$ (I 为单位矩阵, δ 为最小正实数);

(2) 取参考信号 $d(n)$ 、输入信号 $x(n)$;

(3) 对每一时刻 $n = 1, 2, \dots, N$, 进行迭代计算:

增益矢量更新: $g(n) = C(n-1)X(n)/[\lambda + X^T(n)C(n-1)X(n)]$ (1)

滤波输出: $y(n) = W^T(n-1)X(n)$ (2)

误差估计: $e(n) = d(n) - y(n)$ (3)

滤波权向量更新: $W(n) = W(n-1) + g(n)[d(n) - X(n)W^T(n-1)]$ (4)

逆矩阵更新: $C(n) = \lambda^{-1}[C(n-1) - g(n)$

$X^T(n)C(n-1)]$ (5)

上式中 $C(n)$ 为自相关矩阵 $R_{XX}(n)$ 的逆矩阵; $W(n)$ 为自适应滤波器在时刻 n 的权系数矢量; $X(n)$ 为时刻 n 的输入信号矢量; 常数 λ 是遗忘因子, 要求 $0 < \lambda \leq 1$ ^[11]。

2 DSP 实现自适应滤波器

2.1 TMS320VC5416 DSP 特点简介

TMS320VC5416 是 TI 公司推出的一款性能优越的 16 位通用定点 DSP 芯片, 具有典型的增强型哈佛结构, 操作速度高达 160MIPS, 指令周期为 6.25ns。TMS320VC5416 的 CPU 带有一个 40bit 的 ALU, 两个 40bit 的累加器 (ACCA 和 ACCB), 一个 17bit * 17bit 的硬件乘法器, 一个 40bit 的桶形移位器和一个指数编码器, 这些有利于 RLS 算法的快速实现。此外芯片还拥有 128k * 16bit 的片上 RAM 空间 (包括 64k 的 DARAM 和 64k 的 SARAM), 16k * 16bit 的片上 ROM 配置, 3 条独立的 16bit 数据总线, 1 条程序总线, 3 个 McBSP, 6 个独立 DMA 通道^[12]。

2.2 软件程序设计

自适应滤波器 DSP 程序主流程框图, 如图 2 所示; RLS 算法子程序流程图, 如图 3 所示。DSP 实现自适应滤波的程序设计, 主要包括三个步骤:

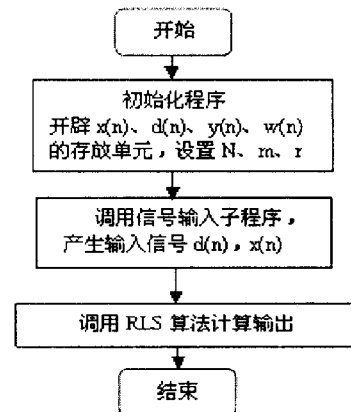


图 2 DSP 程序主流程框图

(1) 程序初始化: 对滤波输入信号 $x(n)$ 、参考信号 $d(n)$ 、滤波输出信号 $y(n)$ 、滤波器加权系数 $w(n)$ 分配存储区, 同时为输入信号的长度 (N)、滤波器长度 (m)、遗忘因子 (r) 设置初值, 这里设置为: $N = 200$, $m = 16$, $r = 1.0$;

(2) 调用信号输入子程序: 产生噪声输入信号 $x[n]$ 、参考信号 $d[n]$ 的程序如下:

for ($i = 0; i < N; i++$)

{ $d[i] = (\text{float})\sin(\pi * i/10)$;

$x[i] = (\text{float})\text{gauss}(0.0, 0.2, \&\text{seed}) + \sin(\pi * i/10)$;

其中子函数 `double gauss(mean,sigma,s)` 用于产生高斯白噪声,参数 `mean`、`sigma`、`seed` 分别为:均值、方差、随机数的种子。

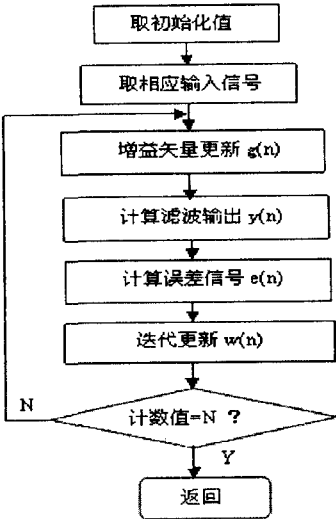


图 3 RLS 算法子程序流程图

(3) 调用 RLS 算法子程序:主程序运行时不断调用 RLS 算法子程序,来计算滤波信号输出。RLS 算法子程序设计如下:

```
void rls(x,d,y,N,w,m,lam);
{
    x,d,y 均为长度为 N 的双精度实型一维数组,x[]存放滤波
    输入信号、d[]存放参考输入信号、y[]存放滤波输出信号;N为
    为整型变量,输入信号的长度;w 为双精度实型一维数组,长度为
    m,自适应滤波器的加权系数;m 为整型变量,自适应滤波器的长
    度(阶数-1);lam 为双精度实型变量,遗忘因子,0<lam≤1;

    double d[ ],x[ ],y[ ],w[ ],lam;
    int m,N;
    { int i,j,k;
        double e,s,*g,*u,*cx,*c,s=1.0;
        g=malloc(m*sizeof(double));
        c=malloc(m*m*sizeof(double));
        u=g,cx=g;
        for (i=0;i<m;i++)
            for (j=0;j<m;j++)
                { c[i*m+j]=0.0; }
        for (i=0;i<m;i++)
            { c[i*m+i]=1.0e+8; }
        for (i=0;i<m;i++)
```

```
        { cx[i]=0.0; }
        // 计算增益矢量更新: g(n) = C(n-1)X(n)/[λ +
        XT(n)C(n-1)X(n)];
        for (k=0;k<N;k++)
            { cx[0]=x[k];
                for (j=0;j<m;j++)
                    { u[j]=0.0;
                        for(i=0;i<m;i++)
                            { u[j]=u[j]+(1/lam)*c[j*m+i]*cx[i]; } }
                for(i=0;i<m;i++)
                    { s=s+u[i]*cx[i]; }
                for (i=0;i<m;i++)
                    { g[i]=u[i]/s; }
        // 计算滤波输出: y(n) = WT(n-1)X(n);
        for (i=0;i<m;i++)
            { y[k]=y[k]+w[i]*cx[i]; }
        // 滤波权向量更新: W(n) = W(n-1) + g(n)[d(n) -
        X(n)WT(n-1)];
        e= d[k]-y[k];
        for (i=0;i<m;i++)
            { w[i]=w[i]+g[i]*e; }
        // 计算逆矩阵更新: C(n) = λ-1[C(n-1) - g(n)XT
        (n)C(n-1)];
        for (j=0;j<m;j++)
            for (i=0;i<m;i++)
                { c[j*m+i]=c[j*m+i]*(1/lam)-g[j]*u[i]; }
        for (i=(m-1);i>=1;i--)
            { cx[i]=cx[i-1]; } } }
```

2.3 DSP 仿真结果

在 CCS 环境下将 C 语言编写的源程序,通过编译、连接后生成公共目标代码,再下载到定点 TMS320VC5416 DSP 中运行。选择 View/Graph/Time/Frequency,进入 Graph Property Dialog 对话框,设置合适的图形显示参数,如表 1 所示。显示窗口显示为自适应滤波器 DSP 仿真结果,如图 4 所示。

3 自适应滤波 RLS 算法 MATLAB 仿真

MATLAB 提供了专门的函数 `ADAPTRLs` 来实现 RLS 自适应滤波,ADAPTRLs 函数的用法为:[y,e,s]=ADAPTRLs(x,d,s),其中 y 为滤波器的输出信

表 1 图形显示参数

	参考信号 d[n]	滤波输入信号 x[n]	滤波输出信号 y[n]
Display Type	Single Time	Single Time	Single Time
Start Address	0x0304	0x04ba	0x069c
Acquisition Buffer Size	200	200	200
Display Data Size	200	200	200
Dsp Data Type	32-bit floating point	32-bit floating point	32-bit floating point

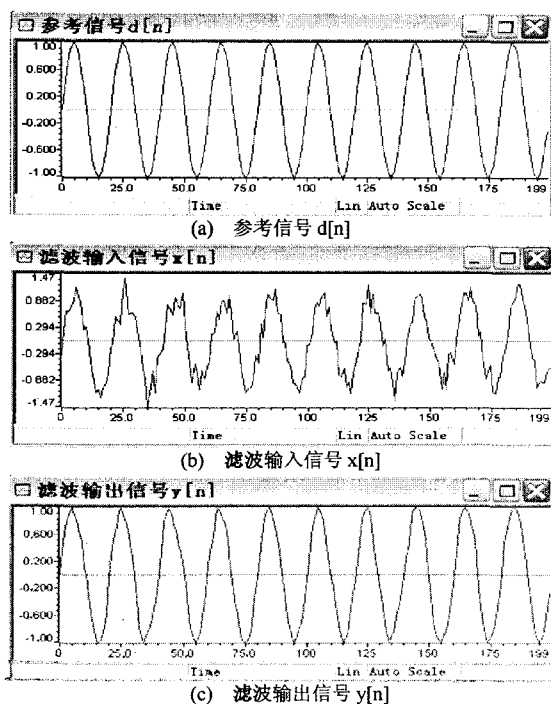


图4 自适应滤波器 DSP 仿真结果

号, e 为误差信号, x 为滤波输入信号, d 为参考信号, s 为包含自适应滤波器信息的结构体, 可使用函数 `INITRLS` 初始化。函数 `INITRLS` 的用法为: $s = \text{INITRLS}(W0, P0, \text{LAMBDA})$, 其中 $W0$ 为滤波器系数的初始值, $P0$ 为初始输入相关矩阵的逆, LAMBDA 为 RLS 算法的遗忘因子, 稳定条件范围: $0 < \text{LAMBDA} \leq 1$ 。程序设计中参数取初值为: 滤波器长度 ($M = 16$)、遗忘因子 ($\text{lam} = 1$); 参考输入信号为: $dn = \sin(0.1 * \pi * t)$; 滤波输入信号为均值为零的高斯白噪声: $xn = \text{awgn}(dn, \text{SNR})$, $\text{SNR} = 15$ 为信噪比; 实验仿真结果如图 5 所示。

RLS 核心算法的程序代码如下:

```
W0 = zeros(1,M); % 滤波器系数的初始化, M 为滤波器的长度
P0 = 5 * eye(M); % 初始化相关矩阵的逆
S = initrls(W0, P0, lam); % 自适应滤波器信息的结构体
[yn, e, S] = adaptrlsl(xn, dn, S); % RLS 自适应滤波, xn 为系统输入信号, dn 为参考输入信号, yn 为滤波输出信号
```

4 结束语

文中采用 C 语言设计出基于 RLS 算法的子程序, 并以 TMS320VC5416 定点 DSP 为平台, 设计了一个 RLS 算法的 16 阶自适应滤波器, 实现对输入加噪信号的有效自适应滤波, 并通过与在 MATLAB 环境下的仿真比较, 验证了文中设计的 RLS 算法滤波器的有效性。文中设计的 RLS 算法子程序在系统辨识、自适应控制和自适应信号处理中都具有较好的应用价值。

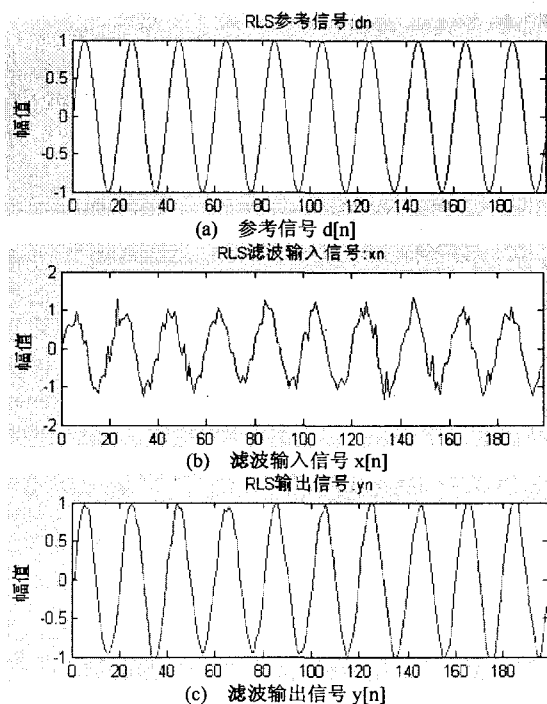


图5 自适应滤波器 MATLAB 仿真结果

参考文献:

- [1] 吕汉闻. 有源电力滤波系统的仿真研究及 RLS 算法的 DSP 实现[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
- [2] 张丹红, 游珍珍. DSP 的多领域应用研究[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(3): 206-207.
- [3] 王丽芳, 陈益平. 基于 DSP 的自适应滤波器的实现[J]. 计算机仿真, 2009, 26(9): 281-284.
- [4] Malcolm D M. Performance of the hierarchical LMS algorithm[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 12(9): 436-437.
- [5] 马伟富, 雷 勇, 滕 欢. 自适应滤波器(LMS)算法及其在 DSP 上的实现[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2004, 41: 470-473.
- [6] 刘 琴, 张爱华. 基于 DSP 的 LMS 自适应滤波器的实现[J]. 中原工学院学报, 2007, 18(6): 40-42.
- [7] 赵巧红, 曾照福. 改进的 LMS 算法自适应滤波器的 DSP 实现[J]. 信息化纵横, 2009(9): 67-69.
- [8] 李正周. MATLAB 数字信号处理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [9] Haykin S. Adaptive Filter Theory[M]. [s. l.]: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [10] 龚耀寰. 自适应滤波—时域自适应滤波和智能天线[M]. 第 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [11] Han Jianguo. A Model-Free Method Based Kalman Filtering Process for Time-Interval-Variable Sequences with Application to Astronomic Surveying[J]. Engineering and Electronics, 2003, 14(2): 29-33.
- [12] 王金龙, 任国春, 沈 良, 等. DSP 设计与实验教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.