基于 Morlet 小波在雷达信号脉内特征提取中的应用*

易　丽[1], 何怡刚[1], 方葛丰[1,2], 樊晓腾[1,2]
(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 中国电子科技集团公司第 41 研究所 电子测试技术国防科技重点实验室, 山东 青岛 266555)

摘　要: 为识别雷达信号不同调制方式,可通过准确估计雷达信号瞬时频率来分析信号脉内特征。通过分析小波脊线原理和 Morlet 小波各种参数对提取调制雷达信号小波脊线特征的影响,提出改进 Morlet 小波原子。针对不同调制类型雷达信号,分析了正确提取信号脊线特征的条件。提出一种基于改进 Morlet 小波的小波脊线方法估计雷达信号的瞬时频率。通过仿真实验表明,与普通 Morlet 小波相比,基于改进 Morlet 小波在提取信号脊线特征时精确度和抗噪性得到提高。

关键词: 瞬时频率; 小波脊线; Morlet 小波; 雷达调制信号
中图分类号: TN911.7　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1001-3695(2013)01-0172-04
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.01.044

Application of modified Morlet wavelet in feature extraction of radar signal to intra-pulse

YI Li[1], HE Yi-gang[1], FANG Ge-feng[1,2], FAN Xiao-teng[1,2]
(1. *College of Electrical & Information Engineering*, *Hunan University*, *Changsha* 410082, *China*; 2. *China National Key Laboratory of Science & Technology on Electronic Test & Measurement*, *The* 41*st Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation*, *Qingdao Shandong* 266555, *China*)

Abstract: In order to recognize different modulation methods of radar signals, estimating accurately the radar signal of the instantaneous frequency to analysis the signal's intra-pulse characteristics. By analyzing the wavelet-ridge theory and the affect of various parameters of the Morlet wavelet to extract the modulated radar signal wavelet-ridge characteristics, this paper proposed a modified Morlet wavelet. Then according to different modulation type of radar signals, it analyzed the correct conditions of wavelet-ridge features extraction, and proposed a method which called wavelet-ridge, it based on modified Morlet wavelet and could estimate instantaneous frequency of the radar signal. Simulation results show that, compared with common Morlet wavelet, based on the improved Morlet wavelet-ridge extract signal features have better precision and less noise.

Key words: instantaneous frequency; wavelet-ridge; Morlet wavelet; radar modulation signal

0　引言

随着新体制雷达的应用,现代靶场中信号环境变得异常复杂,为了识别对方雷达信号调制类型,提取雷达信号的脉内特征是很有意义的[1]。瞬时频率能反映信号每一时刻的频率变化,与幅度相比抗外界干扰强,是描述信号时变特征的重要调制参数,因此如何正确检测瞬时频率在非平稳信号处理中很重要[2,3]。自瞬时频率被提出以来,由于其对非平稳信号的独特描述特性,吸引了大批学者进行研究,涌现了大量的瞬时频率估计算法[4],主要有相位法、谱峰检测法、过零点法以及 HHT 变换法等[5]。相位差分法是一种比较传统的瞬时频率估计方法,其计算简单,但抗噪能力较弱,对噪声有很高的敏感性(方差较大)[6]。目前,时频分析是非平稳信号分析的有效方法,通过时频分析将原来局限于时间或频谱的一维信号处理扩展到二维时频面,使信号时频特征得到分离,进而可将对信号的分析具体到信号的特定时间和特定频率[7]。时频分析法中 WVD 具有较高精度,但其存在无法克服的交叉项以及对噪声敏感等缺陷[8~10]。而小波分析法是时频分析中较好的方法,既可以在时间与频率上同时具备良好的局部化性,又可以聚焦到对象的任意细节加以分析。小波提取脉内细微特征时需要对信号时频域都有较高的刻画,因此本文选择时频特性都比较好的 Morlet 连续小波作为小波基。文献[7,11]都提出改进 Morlet 小波脊线法来获得信号的瞬时频率。为了进一步提高基于 Morlet 小波脊线法的准确度,本文研究 Morlet 小波各个参数对信号调制参数提取产生的影响,通过寻找最优参数来改进

收稿日期: 2012-05-26; **修回日期**: 2012-06-29　**基金项目**: 国家杰出青年科学基金资助项目(50925727);国家自然科学基金资助项目(60876022);湖南省科技计划项目(2011J4, 2011jk2023);国防预研重大项目(C1120110004);广东省教育部产学研计划资助项目(2009B090300196);中央高校基本科研业务费计划资助项目

作者简介: 易丽(1987-),女,湖南岳阳人,硕士研究生,主要研究方向为复杂电磁场信号分析(yili8151383@126.com);何怡刚(1966-),男,湖南邵阳人,教授,博导,主要研究方向为模拟集成电路与故障诊断等;方葛丰(1964-)男,工程师,博士研究生,主要研究方向为电子测试与诊断;樊晓腾(1975-),男,工程师,硕士研究生,主要研究方向为微波信号发生技术.

小波基以提高噪声抑制能力及精确度,并通过实验验证该方法的有效性。

1　小波脊线原理

若存在信号空间 $L^2(R)$,则渐进信号可表示为 $f(t)=A_s(t)\exp(j\varphi_s(t))$,$s(t)\in L^2(R)$ 即其相位变化速度远远快于其幅度变化速度。通过将窗函数 g 乘以正弦波 $\psi(t)=g(t)\exp(j\eta t)$,构造成近似解析小波。经过伸缩平移后的小波为 $\psi_{a,b}(t)=\frac{1}{\sqrt{a}}\psi(\frac{t-b}{a})$,$\int_{-\infty}^{+\infty}\Psi_{b,a}(t)\mathrm{d}t=0$,则渐进信号 $f(t)$ 经过该小波变换后得到

$$Wf(b,a)=\frac{\sqrt{a}}{2}A_s(t)\exp[j\varphi(b)]\{\hat{g}(a[\xi-\varphi'(b)])+\varepsilon(b,\xi)\} \quad (1)$$

其中:尺度 a 在 R^+ 上变化,$\xi=\eta/a$,且 $\xi>0$,$\hat{g}$ 为 g 的傅里叶表示。校正项 $\varepsilon(b,\xi)$ 满足:

$$|\varepsilon(b,\xi)|\leqslant\varepsilon_{a,1}+\varepsilon_{a,2}+\varepsilon_{\varphi,2}+\sup_{|\omega|\geqslant a\varphi'(b)}|\hat{g}(\omega)| \quad (2)$$

其中:$\varepsilon_{a,1}\leqslant\frac{a|A'_s(b)|}{|A_s(b)|}$,$\varepsilon_{a,2}\leqslant\sup_{|t-b|\leqslant a/2}\frac{a^2|A''_s(t)|}{|A(b)|}$;而且,如果 $s|A'_s(b)||A_s(b)|^{-1}\leqslant1$,则 $\varepsilon_{\varphi,2}\leqslant\sup_{|t-b|\leqslant a/2}a^2|\varphi''(t)|$;如果 $\xi=\varphi'(u)$,则 $\varepsilon_{a,1}=\frac{a|A'_s(b)|}{|A_s(b)|}|\hat{g}'(2a\varphi'(b))|$。其中,$a$、$b$ 分别表示小波的伸缩和平移因子;$A_s(b)$、$\varphi'(b)$ 分别是 f 在时间点 b 的解析振幅和瞬时频率。式(1)表明:如果 $A_s(t)$ 和 $\varphi'(t)$ 在 $\psi_{a,b}$ 的支集上有很小的变差,且 $\varphi'(b)\geqslant\Delta\omega/s$,则校正项 $\varepsilon(b,\xi)$ 可以忽略不计,瞬时频率可由小波变换定义的脊来度量。根据式(1)可知,因为 $|\hat{g}(\omega)|$ 在 $\omega=0$ 最大,若不计 $\varepsilon(b,\xi)$,可得在 $\frac{\eta}{a(b)}=\xi(b)=\varphi'(b)$ 最大,定义相应的点 $(b,\xi(b))$ 为小波脊点,而点 $(b,\xi(b))$ 组成的集合称之为小波脊线。此时式(1)可写为

$$Wf(b,a)=\frac{\sqrt{a}}{2}A_s(t)\exp[j\varphi(b)]\{\hat{g}(0)\} \quad (3)$$

式(3)取模,其值对应着信号幅值的变化,脊点处 $\varphi'(b)$ 值对应信号瞬时频率的变化,即

$$\frac{\eta}{A_S(b)}=\xi(b)=\varphi'(b) \quad (4)$$

其中:η 为小波原子中心频率;$A_s(b)$ 为时刻 b 小波模极大值对应的尺度。可见,当信号瞬时频率不变时,小波变换的模极大值出现在相同尺度处;瞬时频率发生变化时,小波变化的模极大值出现位置也发生跳变。

小波函数对信号特征参数突变检测能力高低,是体现小波函数信号处理性能优劣的重要标志。为了能够更正确地提取信号调制特性,小波函数选取必须满足以下条件:

假设小波变换 $WT(t,r(t))$ 随着调制参数 $r(t)$ 变化而变化,则小波函数 $\psi(t)$ 要检测 $r(t)$ 变化瞬时性必须满足以下条件:

a)如果 $r(t)$ 不变,那么输出的小波系数模恒定,其中 $WT(t,r(t))=c(a)$ 仅依赖于 a,独立于 t。

b)若参数 $r(t)$ 在时刻 τ 变化,则输出小波系数模不再等于 $c(a)$:$|WT_\psi(a,b,r(t)\text{变化})|\neq c(a)$。

c)应当使得 τ 时刻小波变换系数和 $c(a)$ 之间的差值最大,更加容易检测到突变,可得到小波脊点,即 $D=\max(||WT_\psi(a,\tau,r(t)\text{变化})|-c(a)|)$。

以上三个条件,为选择小波基提供了依据。

当雷达调制信号调制参数(包括幅度、相位、频率)发生变化时,相应信号时频分布也发生变化。小波变换可检测出信号时频分布及其时频分布变化特征,据此估计调制参数类型及其相应的变化规律、变化量。以上述三个条件为依据,可选择具有更高检测率的小波基。本文采用 Morlet 小波作为信号分析和处理的主要方法。

2　改进 Morlet 小波

根据小波脊原理分析,提取小波脊线就可以估计信号的瞬时频率,从而获得识别信号的重要参数。为提高提取小波脊线估计瞬时频率的准确度,本文将改进 Morlet 小波原子。Morlet 小波在形式上为指数函数 $e^{j\omega\varphi t}$ 上加一个高斯窗,其时域特征与 PSK 等非恒包络信号具有高度相似性,频谱结构相似,抗信噪比能力强。下文从 Morlet 小波各参数对信号调制参数的影响分析入手,改进 Morlet 小波。对于 Morlet 小波,有

$$g(t)=\exp(-t^2/k)\exp(j\omega_0 t) \quad (5)$$

其近似满足容许性条件,一般要求 $k\geqslant2$,$\omega_0\geqslant5$。其傅里叶变换为

$$g(\omega)=\sqrt{\pi k}\exp[-k(\omega-\omega_0)^2/4] \quad (6)$$

其中,k 是控制小波时域持续时间的参数。从图 1 中可得出,k 值越大,小波时域持续越长,其时域包络线逐渐逼近余弦函数的一段,频域分辨率变高,但时域分辨率就降低。由于提取信号调制参数特征时,需分析时域瞬变特征和频域特性,因此,对于 Morlet 小波函数,最佳 k 值选择要根据具体情况而定。

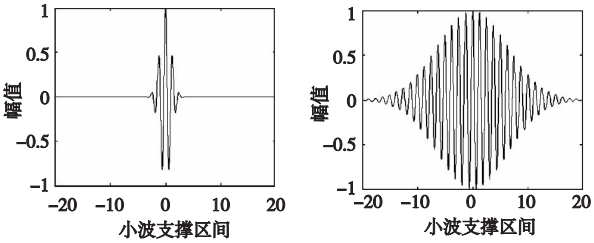


图1　Morlet小波时域图

为使小波基的参数选取具有一定自适应性,同时具有较高检测率,文献[7]对普通 Morlet 小波基进行变换,即

$$g_1(t)=\cos(t^2/k)\exp(j\omega_0 t)\quad t\in[-T,T] \quad (7)$$

其中,T 为小波支撑区间。相比式(5),式(7)增大了小波的幅频特性(图 2)。

实际上,式(7)可以看做是式(5)增大 k 值拉伸小波近似逼近余弦函数的一段(图 1)。但是由上述分析可知 k 不能任意变化。式(7)虽然增大了时窗,具有较好的幅频特性,但时域分辨率却大为降低,在整个时频域内,其检测概率与检测精度并非达到最佳。为使时频分辨率较好地结合,对式(7)小波原子作如下修改:

$$g_2(t)=\cos(t/k)\exp(j\omega_0 t)\quad t\in[-T,T] \quad (8)$$

此时 $k=2T/\pi$。由梯形积分法可得 $\int_{-\infty}^{0}g_2(t)\mathrm{d}t=0$,近似满足容许条件,当 $t\in[-k\pi/2,k\pi/2]$,式(6)的傅里叶变换为

$$g_2(\omega)=\frac{k}{k(\omega-\omega_0)+1}\sin(\frac{k\pi(\omega-\omega_0)+\pi}{2k})+\frac{k}{k(\omega-\omega_0)-1}\sin(\frac{k\pi(\omega-\omega_0)-\pi}{2k}) \quad (9)$$

式(9)改进小波原子 Mor2(图 3),既具有 Mor1 的时域窗口长度、高检测概率和抗噪性能的特点,又具有较好的快速衰减,比 Mor2 更能满足容许条件。因此,相比 Mor1 改进的小波基,图 3

表示的 Mor2 小波基具有更好的时频分辨率。普通 Morlet 小波虽然有较高的时域分辨率,但是其频域分辨率较低。

图 4 描述了这些小波的幅频特性,其中普通 Morlet 小波的幅值比 Mor1 和 Mor2 小得多,通过改进使 Mor2 的幅频特性达到更好的效果。同时考虑时频分辨率,图 3 小波的幅频特性相对较优。针对渐近信号,利用 Mor2 小波提取信号小波脊线特征将具有较高的精确度和抗噪性。

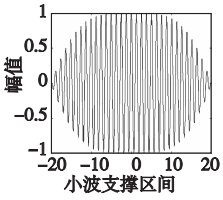


图2　Mor1小波波形图

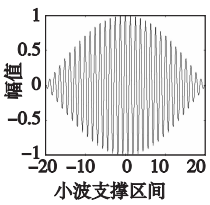


图3　Mor2小波波形图

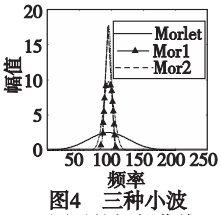


图4　三种小波原子的幅频曲线

3　提取雷达调制信号脊线特征的小波变换参数分析

小波变换过程中,基小波时频窗口形状因小波分解尺度不同而不断变化以反映信号时频特性。而时间—频率分辨率相互制约,对具有不同频率特性(不同脊线特征)的雷达调制信号,其 Morlet 小波原子参数选取要视具体情况而定。通过对 Morlet 小波原子的改进($\omega_0 \geqslant 5$),当信号载频为 ω_s,即 $\varphi'_s(b) = \omega_s$,依据式(1)~(3),若忽略校正项 $\varepsilon(b,\xi)$,则有 $\varphi'_s(b) \geqslant \dfrac{\Delta\omega}{a}$ 成立。

当 $\xi = \omega_0/a = \omega_s$ 时,有 $\omega_s \geqslant \dfrac{\Delta\omega}{\omega_0}\omega_s \Rightarrow \Delta\omega \leqslant \omega_0 \Rightarrow \Delta t\Delta\omega \leqslant \Delta t\omega_0$。其中:$\omega_s$ 是分析信号载频;ω_0 是小波函数中心频率;$\Delta\omega$ 为式(1)中定义的 $\hat{g}$ 带宽;Δt 为 Morlet 小波支集。

由不确定性原则 $\Delta t\Delta\omega \geqslant \dfrac{1}{2}$,故有

$$\Delta t\omega_0 \geqslant \frac{1}{2} \Rightarrow \Delta t a\omega_s \geqslant \frac{1}{2} \Rightarrow a \geqslant \frac{1}{2\Delta t\omega_s} \tag{10}$$

由式(10),对于分析小波,若取最大时间窗 $\Delta t = 8$,则有 $a \geqslant 1/16\omega_s$。

分析信号为编码信号时,在一个子码周期 T_c 内,瞬时频率保持不变,若要满足其在小波支集上有较小变差,则对尺度为 a 的解析小波,其支集长度 $a\Delta t$ 小于子码周期,即($\Delta t = 8$)

$$a\Delta t \leqslant T_c \Rightarrow a \leqslant \frac{T_c}{8} \tag{11}$$

由式(11)有 $\dfrac{\omega_0}{\omega_s}\Delta t \leqslant T_c$,$\omega_0 \geqslant 5$,$k \geqslant \dfrac{2T}{\pi}$,$T = \Delta t$,$\omega_0 = 2\pi$,则

$$\frac{\omega_0\Delta t}{2\pi f_0} \leqslant T_c \Rightarrow \frac{2\pi \times 8}{2\pi f_0} M \leqslant T_c M \Rightarrow \frac{8M}{f_0} \leqslant T_p \tag{12}$$

其中:f_0 为相位编码信号载频;M 为码元个数;T_p 为脉冲宽度。

式(12)表明,编码信号脊线特征提取与载频和脉宽有关,其脉冲宽度应大于 $8M/\pi f_0$,采用上述算法才能提取明显的小波脊线。也就是说,并不是任意信号不经过预处理都能用提取小波脊线的方法来识别,其解决办法是对信号实行频谱搬移(即混频)以降低载波频率或者通过插值运算等进行信号预处理。针对时变调频雷达信号(如线频、非线性调频、线性步进调频等信号),频率在短时间有一个较大变差,提取小波脊线不能忽略校正项。因此,采用小波脊线估计信号瞬时频率存在偏差,信号调频幅度越大,频率变化越快,估计误差也越大,脊线检测概率就越小。对这类信号,使用小波脊线估计瞬时频率存在一定偏差。针对这类信号的脊线提取,分析其原理可以这样认为:在时域上某一极小时间段 ΔT 内认为信号的频率不变,近似忽略校正项,即 $a\Delta t \leqslant \Delta T \Rightarrow \dfrac{\omega_0}{\omega_i}\Delta t \leqslant \Delta T$,$\omega_i$ 为第 i 段的瞬时频率。若 $\Delta T = n\dfrac{1}{f_s}$,$f_s$ 为采样频率,则

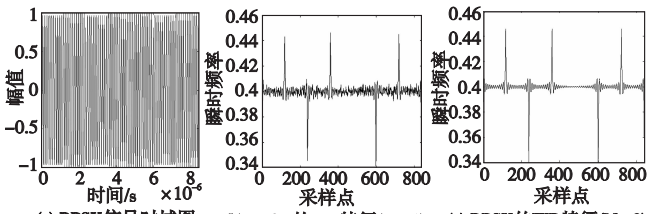
$$\omega_0\Delta t \leqslant \omega_{\max} n\frac{1}{f_s} \Rightarrow 8 \leqslant n\frac{f_{\max}}{f_s} \Rightarrow 16 \leqslant n, \left(f_{\max} \leqslant \frac{f_s}{2}\right) \tag{13}$$

式(13)表明,在提取脊线时至少以 $\Delta T = 16/f_s$ 为一小段进行划分;但并不是 f_s 越大越好,当 f_s 增大时,n 也相应地增大。因此,要改善脊线提取的效果,有效办法是在 f_s 和最大 Δf 一定时,增大脉宽以增加采样点数,从而减少 Δf 内频率变化,达到提高脊线提取精度的目的。被提取脊线在几何形状上几乎与瞬时频率变化曲线保持一致,即使估计瞬时频率有偏差,由于保持了信号独特的瞬时参数特征几何形状,不会影响识别辐射源信号的效果。

4　实验及讨论

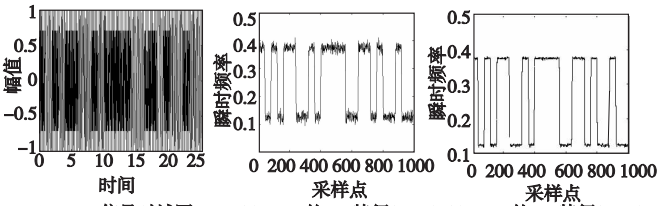
以雷达辐射源二频率编码信号(2FSK)、二相编码信号(BPSK)以及线性调频信号为例,分别利用图 2 中改进的 Mor1 和本文改进的图 3 中 Mor2 来提取信号小波脊(WR)特征。为精确快速地提取信号 WR 特征,依据式(5),本文采用快速迭代算法提取辐射源信号的 WR 特征,具体算法参考文献[5]。

图 5、6 为无噪声理想环境下,采用基于 Mor1 和 Mor2 原子小波脊线法来估算雷达信号中 BPSK 信号的瞬时频率,其归一化中心频率为 0.4。图 5(b)为利用 Mor1 小波原子得到的瞬时频率,(c)为本文改进后小波原子计算得到的瞬时频率。通过仿真图形可得出,改进的 Mor2 小波原子得到了准确性更高的瞬时频率,同时验证了该方法的有效性。图 6 为雷达信号中频率调制信号(2FSK),多次仿真结果相同。通过上面的实验结果可知本文改进 Morlet 小波脊线法得出瞬时频率的有效性。



(a) BPSK信号时域图　(b) BPSK的WR特征(Mor1)　(c) BPSK的WR特征(Mor2)

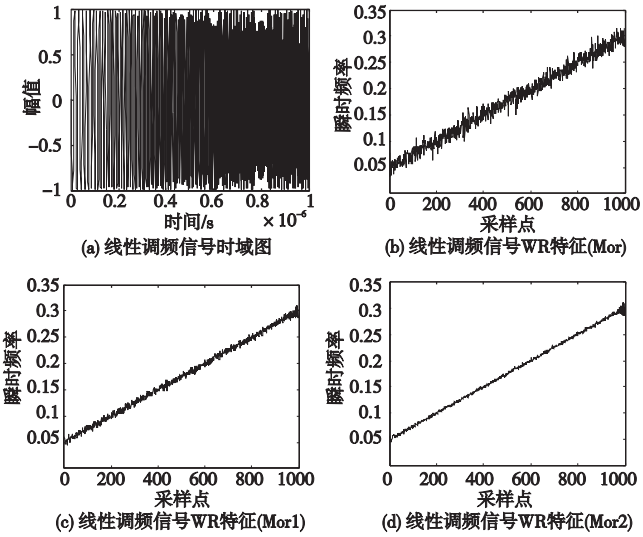
图5　BPSK的WR特征



(a) 2FSK信号时域图　(b) 2FSK的WR特征(Mor1)　(c) 2FSK的WR特征(Mor2)

图6　2FSK的WR特征

下面通过仿真实验来分析本文提出的方法在噪声背景下提取特征的准确性。以线性调频信号为例,该信号的参数为:雷达的脉冲持续时间 $T = 10$ ms,调制带宽 50 MHz,采样频率 100 MHz。其时域波形如图 7(a)所示,对于脊线特征提取精度而言,(b)~(d)分别表示在噪声背景下利用各种小波脊线法估计瞬时频率曲线,其中(b)表示利用原始 Morlet 小波提取的瞬时频率特征曲线,(c)(d)分别表示用 Mor1 和 Mor2 小波的小波脊线法求得的瞬时频率曲线。



(a) 线性调频信号时域图　(b) 线性调频信号WR特征(Mor)

(c) 线性调频信号WR特征(Mor1)　(d) 线性调频信号WR特征(Mor2)

图7　线性调频信号WR特征

从图 7 对比中可得出,利用改进 Mor2 小波提取线性调频信号瞬时频率精确度相对于原始 Morlet 有较大提高。但在提取特征末端出现相比前面较大的波动,但总体效果相比于 Mor1 和原始 Morlet 小波提取特征曲线较好。虽然噪声影响导致频率估计出现较大误差,但仍能从图中获取到瞬时频率呈线性变化,且与理想情况变化斜率相同。因此,根据第 2、3 章理论分析与图 7 的实验结果可以得出结论:基于改进 Morlet 小波的脊线特征提取精度和抗噪性能要优于基本 Morlet 小波,它能更准确地估计雷达信号的瞬时频率。

5　结束语

本文提出了一种基于改进 Morlet 小波的小波脊线方法。通过分析小波脊线原理和 Morlet 小波各种参数对提取调制雷达信号小波脊线特征曲线的影响,提出改进的 Morlet 小波原子。实验表明,使用改进的小波提取调制信号的脊线特征具有较好的抗噪性能,在辐射源信号分选识别方面具有较好的应用前景。

参考文献:

[1] 韩俊,何明浩,冒燕. 低信噪比下雷达信号脉内特征的提取[J]. 雷达科学与技术,2007,3(5):220-223.

[2] BOUALEM B. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal Ⅱ: algorithms and application[J]. Proceedings of the IEEE,1992,80(4):540-568.

[3] GUSTAVO L R,JESUS G ALVORA S. Digital channelized receiver based on time frequency analysis for signal interception[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems,2005,41(3):879-898.

[4] DJUMVIC I,STANKOVLC L J. An algorithm for the Wigner distribution based instantaneous frequency estimation in a high noise environment[J]. Signal Processing,2004,84(3):631-643.

[5] DELPART N. Asymptotic wavelet and Gabor analysis extraction of instantaneous frequencies[J]. IEEE Trans on Information Theory,1992,38(3):644-664.

[6] 郁春来,万建伟,徐如海,等. 改进小波脊线法算法分析和仿真[J]. 现代雷达,2005,27(8):46-48.

[7] 任春辉,魏平,肖先赐. 改进的 Morlet 小波在信号特征提取中的应用[J]. 电波科学学报,2003,18(6):633-637.

[8] 陈昌孝,何明浩,朱元清. 基于综合时频检测的雷达信号脉内提取[J]. 弹箭与制导学报,2008,28(4):215-218.

[9] 李平,康宏,童宁宁. 一种低信噪比下二相编码信号脉内特征特取方法[J]. 现代防御技术,2010,38(4):122-126.

[10] SHENNA M J. The discrete wavelet transform: wedding the a trous and Mallat algorithm[J]. IEEE Trans on SP,1992,40(10):2464-2482.

[11] 余志斌,陈春霞,金炜东. 一种新的 Morlet 小波及其在雷达信号特征提取中的应用研究[J]. 电路与系统学报,2010,15(1):129-134.

[12] HONG Liang,HO K C. Identification of digital modulation type using the wavelet transform[J]. IEEE MILCOM,1999(1):427-431.

(上接第 168 页)

3　结束语

本研究基于重力坝极限状态设计的方法和原则,利用 VB 6.0 可视化编程工具实现了重力坝的三维设计程序化,在整个设计过程中通过不断与 CAD 进行动态交互,利用 CAD 强大的几何分析功能,实现了 CAD 设计和计算分析的有效结合,很大程度上提高了计算速度和精度。结合本系统在实际工程中的应用得出以下结论:

a)基于三维设计方法,通过三维参数化实体造型技术可快速建立重力坝坝体三维实体模型,并满足各个设计阶段的需要,为设计人员提供一个直观的设计成果,大大增强了设计可视化程度。

b)通过三维参数化设计可快速实现重力坝断面设计,结合动态交互的计算系统可实现对众多方案的快速比选,为设计人员提供了方便。

c)采用动态交互功能实现设计和计算系统的有效结合,通过动态交互功能减少了大量复杂数据的人为干预,通过计算结果和断面信息的动态交互达到快速、智能化地完成断面设计的目的,使设计人员提高了工作效率。

d)利用 VBA 技术开发了三维工程图快速输出子模块,能够快速输出可直接用于工程施工的设计坝段三维、二维工程图纸,并且实现了工程图纸的半自动标注,为设计人员节省了大量的作图劳动时间。

e)根据本系统计算结果及在工程中的实际应用,计算结果可靠、可满足设计要求,特别是对于水电建设的初期可研阶段具有较大的实用性,可快速评价设计方案和修改方案,缩短设计周期。

f)本文系统以工程设计人员最熟悉的 AutoCAD 为基础,利用 VB 6.0 程序语言对 CAD 进行二次开发,便于设计人员掌握和理解,故适用性较广。

参考文献:

[1] 张社荣,顾岩,张宗亮. 水利水电行业中应用三维设计的探讨[J]. 水力发电学报,2008,27(3):65-69.

[2] WANG Song-hao,MELENDEZ S,TSAI C S,*et al*. Parametric design and design associability in 3D CAD[J]. Materials Science Forum,2008,594:461-468.

[3] 孙立镌,王爱华. 基于特征的 CAD/CAE 集成中并行建模技术研究[J]. 计算机应用研究,2009,26(3):917-919.

[4] 中华人民共和国电力行业标准 DL5108—1999,混凝土重力坝设计规范[S]. 北京:中国电力出版社,2002.

[5] 肖岸纯,丁建军. AutoCAD 图形识别系统的研究[J]. 湖北工学院学报,2004,19(2):48-50.

[6] 刘国明. 古田溪一级重力坝悬臂梁振型分解反应谱法抗震计算[J]. 水力发电学报,2004,23(1):31-35.