

光学小波变换*

赵维义

宋菲君 俞蕾

(华中理工大学物理系 武汉 430074) (中国大恒集团公司 北京 100080)

S. Jutamulia

(美国 In - Harmony 公司 CA 94952)

摘要 首先讨论了常规傅里叶变换的缺点, 导入短时傅里叶变换及小波变换, 分析了小波变换的特点和实现小波变换的光学方案, 在空域和频域中详细分析了利用高斯 - 哈尔小波变换进行边缘探测的特征, 介绍了小波变换图形识别的结果.

关键词 小波变换, 光学信息处理, 匹配滤波, 图形识别, 边缘探测

OPTICAL WAVELET TRANSFORM

ZHAO Wei-Yi

(Huazhong University of Science and Technology, Wu Han 430074)

SONG Fei-Jun YU Lei

(China Daheng Group, Incorporation, Beijing 100080)

S. Jutamulia

(In - Harmony Company, CA 94952, USA)

Abstract The authors discuss the shortcoming of the Fourier transform, then introduce the short - time Fourier transform and the wavelet transform. Their features and optical implementation are given. The results and comparison of the match filtering characteristic identification for the conventional and wavelet transforms are presented.

Key words wavelet transform, optical information processing, match filtering, characteristic identification, edge detection

1 引言

傅里叶变换已成为信息处理中的一个极为重要的工具, 在科学和技术的许多领域中获得广泛的应用. 信号 $g(x)$ 的傅里叶变换定义为

$$G(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \exp(-i2\pi\nu x) dx, \quad (1)$$

其逆变换

$$g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\nu) \exp(i2\pi\nu x) d\nu, \quad (2)$$

(1)式表示信号 $g(x)$ 中频率为 ν 的成分含量为 $G(\nu)$, x 可以是时间变量或空间变量, $G(\nu)$ 则表示时间频率或空间频率的成分含量. (1)式表示, $G(\nu)$ 是 $g(x)$ 乘以表示简谐振动或平面波的指数函数 $\exp(-i2\pi\nu x)$ 的积在 $-\infty$ 到 ∞ 的积分; (2)式则表示

信号 $g(x)$ 可以分解为一系列的简谐振动或平面波的线性叠加, $G(\nu)$ 正是叠加运算中的权函数.

如果 $g(x)$ 是一个时域或空域中分布在 $(-\infty, \infty)$ 中的稳恒过程或稳定分布, 则傅里叶分析给出了近乎完美的结果.

然而, 在自然界和科学技术中还有大量信号, 它们具有局部的或定域的特性. 例如语言信号、声纳信号、各种电脉冲等, 这些信号的不显著为零的分量只出现在一个短暂的时间间隔内, 此后很快衰减到零, 称为快速过程或暂态过程.

图1给出这样一个信号 $S(t)$, 它可以是声纳的波包, 也可以是地震波. 该信号的特点是在某一时刻 t_0 突然出现(此前可能完全没有信号), 且经过时间

* 1999 - 11 - 25 收到初稿, 1999 - 12 - 15 修回

τ 很快衰减到零,所以是一个很短暂的信号,可以称为“小波”信号.

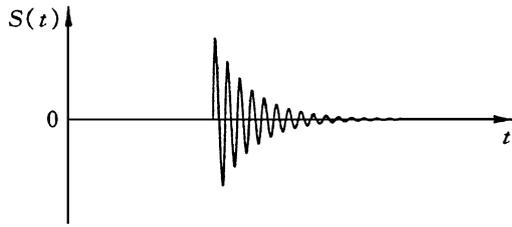


图1 “小波”信号

许多光学信号具有同样的特征,例如远处空中的目标、显微镜下的小物体、被鉴别的指纹等,它们不显著为零的分量只分布在有限的区域内.上述信号称为局部信号或暂态过程.对于局部信号或暂态过程,傅里叶分析就不完全适用.首先,我们仅对 Δt 内的时间信号感兴趣,没有必要在过去、现在及未来的无限长时间范围内对信号进行分析;类似地,在处理定域于 Δx 内的空间图像时,也没有必要对全平面内的信号进行全局的分析.

在许多情况下,在 Δt 或 Δx 以外的信号是未知的,它可能是零,也可能是背景噪声;对它们我们不太了解,测不准,或不感兴趣.如不加选择地把 $(-\infty, \infty)$ 内全部信号进行傅里叶处理,还可能产生较大的误差甚至错误.

此外,一个局部的信号在 Δt 或 Δx 以外较远处几乎完全等于零.当用它们的频谱来恢复或重构这些信号时,在 Δt 和 Δx 外很远处也会出现一些非零的分量,它们一般不是信号,而是在傅里叶逆变换中频域综合不够充分而产生的噪声.

在一些课题中,我们往往不满足于了解信号在全部区间内的综合的频谱分布,而希望了解某一区间或某些区间内的信号对应的频谱.例如在地震勘探中,为了分辨分层的地层和矿床结构,我们需要在时域和频域中仔细分析不同时刻的信号在不同频谱区间中的行为,而傅里叶分析只能提供在长时间内的信号整体的频谱,显然不能满足我们的要求.

近年来发展起来的小波分析,正好克服了傅里叶分析的上述缺点.它和傅里叶分析的一个重要区别,在于它恰恰适用于处理局部或暂态信号.因此,小波分析已成为数学和信息处理中的一个新兴的学科分支.

在本文中,作者从短时傅里叶变换(short-time Fourier transform)的分析入手,引入小波变换的基本观念,然后讨论小波变换的基本性质,并介绍小波变换在光学信息处理中的应用.对于小波变换的理

论有兴趣的读者,可参阅 Chui 的经典著作^[1],以及 Li^[2], Shen^[3]等撰写的综述.

2 从短时傅里叶变换到小波变换

为了有效地提取一个局部信号 $g(x)$ 的信息,我们必须引入一个局部化的变换.所谓局部化,包含两个要素:第一,被分析的区间要有一定的宽度 Δx ,我们仅对 Δx 及其附近的信息进行处理;第二,被分析的区间有一个中心坐标 x_c ,当 x_c 改变时,就可以提取不同的信息.

为了实现局部化,一个有效的方案是将傅里叶变换基元函数乘一个窗函数 $\omega(x - x_c)$ 再进行变换, x_c 为窗函数 ω 的中心.如果 $\omega(x)$ 和它的傅里叶谱 $W(\nu)$ 有足够快的衰减速度,窗函数就是一个局部化的函数.

由于窗函数具有局部处理的功能,上述定义的变换称为短时傅里叶变换(short-time Fourier transform,简记为 STFT,以区别于常规傅里叶变换 FT).在 STFT 中,频率变量 ν 和坐标变量 x_c 同时出现在变换函数中,这是短时傅里叶变换和常规傅里叶变换的一个重要区别.在常规的傅里叶变换中,坐标变量和频率变量分别单独出现在信号函数 $g(x)$ 和它的频谱 $G(\nu)$ 中.在 STFT 中,正是 x_c 和窗口宽度 $\Delta\omega$,使这一变换具有局部处理的功能.改变 x_c ,窗口就在空域中移动,以获取不同区域的信息(x_c 通常称为位移因子),而 $\Delta\omega$ 则限制了被处理空间的范围.

与 $\Delta\omega$ 相对应,存在频率窗宽度 ΔW .当 $\Delta\omega$ 和 ΔW 都有限时,我们称函数 $\omega(x)$ 在空域和频域同时局部化. $\Delta\omega \Delta W$ 称为空间-频率窗,它限制了空域和频域中被处理区域的范围.短时傅里叶变换的局部性,其特征在于处理过程限制在空间-频率窗内进行,且窗的位置是可变的.然而无论 $\Delta\omega$ 还是 ΔW 都是常数,不会随信号中心频率的变化而变化,这使短时傅里叶变换在处理一些奇异性的信号时显得无力.恰恰是在这一点上,小波变换具备比短时傅里叶变换更强的功能.

早在 1946 年, Gabor 就提出了一个变换,称 Gabor 变换:

$$\Gamma_{\sigma, b}\{g\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \exp(-i2\pi\nu x) \cdot$$

$$\exp\left[-\frac{(x-b)^2}{2\sigma^2}\right] dx, \quad (3)$$

其中 σ 和 b 为变换的参数. Gabor 变换就是高斯窗短时傅里叶变换. 窗的中心为 $x = b$, 窗的宽度 $\Delta\omega = \sqrt{2}\sigma$, 窗函数的傅里叶变换也是高斯函数, 频率窗宽度 $\Delta W = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma}$, 因此有 $\Delta\omega\Delta W = \frac{1}{\pi}$.

在图 2 中, 横坐标表示空间坐标, 纵坐标表示频率坐标, 该图将空域和频域同时表达出来, 称空间-频率坐标系, 空-频窗则表示为图中的一个矩形. Gabor 变换空-频窗的高度和宽度都是恒定的.

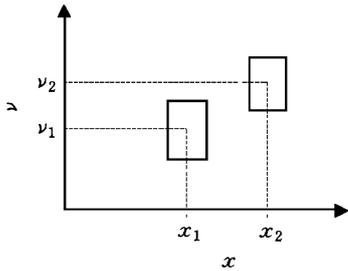


图 2 Gabor 变换空间-频率窗^[1]

Gabor 变换具有如下特点: 它给出一个中心位于 b 、宽度为 $\sqrt{2}\sigma$ 的空间窗, 从而实现空域处理的局部化; 与之相应, 它又给出一个中心位于 ν 、宽度为 $1/(\sqrt{2}\pi\sigma)$ 的频率窗, 从而实现频域处理的局部化. 用 Gabor 变换来处理信号时, 处理过程限制在空-频窗内进行, 窗的面积为 $1/\pi$. 但 Gabor 变换频率窗中心频率不会随空间窗宽度 ($\sqrt{2}\sigma$) 的变化而变化.

为了克服 Gabor 变换中窗口尺寸不能变动的缺点, 我们可以对它略加改造成为 Morlet 小波变换. 引入参数 a, b , 把变换改写为

$$W_{a,b}\{g\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi a}} \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \exp\left[-i2\pi\left(\frac{\nu}{a}x\right)\right] \cdot \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}\left(\frac{x-b}{a}\right)^2\right] dx. \quad (4)$$

将上式与 (3) 式相比较, 发现 Morlet 小波变换与 Gabor 变换的实质性差别在于, 小波变换的中心频率为 ν/a , 随参数 a 的增大而减小. 容易算出小波变换的空间窗宽度为 $\sqrt{2}\sigma a$, 频率窗宽度为 $1/(\sqrt{2}\pi\sigma a)$. 当中心频率增高时 (a 减小), 空间窗宽度变小而频率窗宽度增大, 可以处理更多的高频信息; 当中心频率降低时 (a 增大), 频率窗变小而空间窗加宽, 可以容纳足够多个空间周期, 以保证处理精度. 小波变换的空间-频率窗见图 3.

图 4 和图 5 分别给出不同中心频率下 Gabor 变换和 Morlet 小波变换的基元函数的波形. 在 Gabor

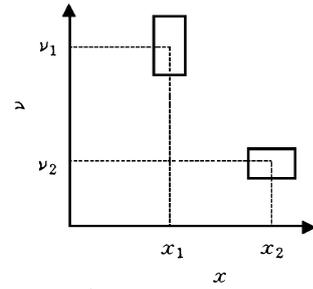


图 3 小波变换空间-频率窗

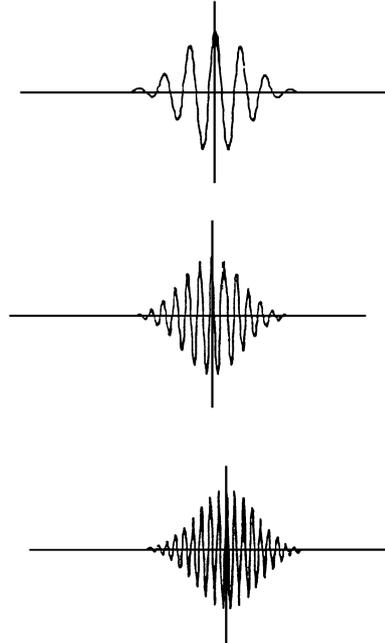


图 4 Gabor 变换基元函数^[3]
(由上至下, 中心频率分别为 1, 2, 3)

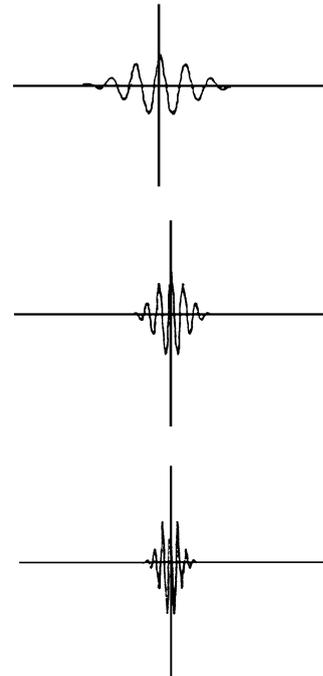


图 5 Morlet 小波变换基元函数^[3]
(由上至下, a 分别为 1, 0.5, 0.33)

变换中,窗的宽度是常数,当中心频率增高时,一定宽度的空间窗内包含的空间周期增加,所以变换的精度是随频率而变化的;而在 Morlet 小波变换中,在处理低频信号时空间窗自动加宽,在空间窗范围内包含的信号空间周期相同,这就保证了小波变换以同样的精度去处理不同中心频率的信号,这正是小波变换与短时傅里叶变换的根本区别.有关短时傅里叶变换的进一步研究,请参阅 Yu 和 Lu 的论文^[4].

3 小波变换的定义、性质和实现小波变换的光学系统

母函数 $h(x)$ 的基本小波函数 $h_{a,b}(x)$ 定义为

$$h_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} h\left(\frac{x-b}{a}\right), \quad (5)$$

式中 b 称为小波变换的位移因子, $a > 0$ 称为伸缩因子.由图 5 可以看出,当 a 增大时,小波的宽度加大(膨胀),而当 a 减小时,小波的宽度变小(收缩).上式表明小波函数是母函数经平移和缩放的结果.

信号函数 $g(x)$ 的小波变换定义为缩放后的母函数与信号函数的相关,即

$$\begin{aligned} W_{a,b}\{g(x)\} &= \frac{1}{\sqrt{a}} h\left(\frac{b}{a}\right) \odot g(b) \\ &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} h^*\left(\frac{x-b}{a}\right) g(x) dx, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 \odot 表示相关运算,母函数的中心位移 b 是相关函数的变量.由于相关运算比较容易用光学相关器进行,因此小波变换可以用我们已熟悉的的光学相关系统来实现,又称光学小波变换.由 Parseval 定理,立即得到

$$W_{a,b}\{g(x)\} = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{\infty} H^*(a\nu) G(\nu) \exp(i2\pi b\nu) d\nu, \quad (7)$$

其中 $H(\nu)$, $G(\nu)$ 分别为 $h(x)$, $g(x)$ 的傅里叶变换.上式正是匹配滤波的频域表达式,匹配滤波可以用标准的 $4f$ 系统实现,在 $g(x)$ 的傅里叶变换平面上,用小波函数的谱 $H^*(a\nu)$ 对 $g(x)$ 的谱 $G(\nu)$ 进行滤波,就可以实现小波变换.图 6 表示一个二维光学小波变换系统:

将二维信号函数 $\phi(x, y)$ 经过空间光调制器 SLM_1 输入系统,则在透镜 L_1 的谱面上将出现它的谱 $\psi(u, \nu)$.在谱面上放置第二个空间光调制器 SLM_2 ,将匹配滤波函数 $H^*(a_x, u, a_y, \nu)$ 通过

SLM_2 对 $\psi(u, \nu)$ 进行滤波,再经过第二个透镜 L_2 ,在输出平面上得到它的傅里叶逆变换.由(7)式可知 H^* ψ 的傅里叶逆变换,即信号 $\phi(x, y)$ 的小波变换 $W_{a_x, a_y, b_x, b_y}\{\phi(x, y)\}$.

我们注意到,位移因子 (b_x, b_y) 是与输出平面的坐标对应的变量,但伸缩因子 (a_x, a_y) 却是给定的,亦即我们只能对给定的伸缩因子 (a_x, a_y) 实现小波变换,不同的 (a_x, a_y) 的变换只能通过依次输入不同的匹配滤波函数 $H^*(a_x, u, a_y, \nu)$ 来实现,速度很慢,发挥不了光学系统并行处理的优越性.

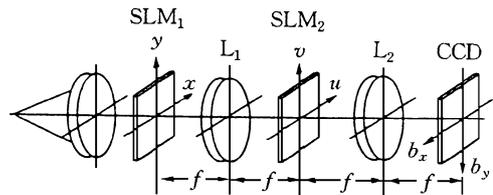


图 6 用 $4f$ 系统实现光学小波变换

为了改善图 6 所示光学小波变换系统的性能,可以用重铬酸明胶(DCG)或光折变晶体代替谱面上的空间光调制器 SLM_2 , DCG 或光折变晶体构成体全息存储器件.将缩放后的分立的母函数 $h_{mm} = h(x/a_m, y/a_n)$ 经 SLM_1 输入系统,则在谱面上产生了它的傅里叶变换 $H_{mm} = a_m a_n H(a_m u, a_n \nu)$.以它为物光,并用倾斜的平行参考光照射体全息器件,就会形成全息图,存储在器件中.将信号 $\phi(x, y)$ 经 SLM_1 输入系统,在谱面上它的傅里叶变换 $\psi(u, \nu)$ 经全息图滤波,在输出平面 CCD 上就会发现离轴的相关输出:

$$h\left[\frac{b_x - a_m}{a_m}, \frac{b_y - \beta_n}{a_m}\right] \odot \phi(b_x - a_m, b_y - \beta_n),$$

其中 a_m 和 β_n 为参考光的方向余弦,它恰恰就是信号的小波变换 $W\{\phi\}$,变换的参量为 $(a_m, a_n, b_x - a_m, b_y - \beta_n)$ ^[7],这正是光学信息处理离轴匹配滤波的典型方案.用不同方向的参考光和不同下标的母函数形成多个全息图,预先存储在器件中,输出平面上就会出现多个互相分离的小波变换输出,这一手续称为角度编码.目前全息器件的存储密度已相当高,在晶体中可以存储多个小波变换匹配滤波器.该器件原则上也可以用衍射光学元件实现.

一维的小波变换也可以用 $4f$ 系统实现^[2],常规的 Haar 变换还可用投影-掩模方案或偏振编码方案实现^[7].

并非任何函数都可以作为小波变换的函数 $h(x)$, $h(x)$ 必须在 $|x| \rightarrow \infty$ 时衰减到零.实际使用

的小波变换母函数 $h(x)$, 当 $|x| \rightarrow \infty$ 时迅速衰减, 使它的不显著为零的分量只存在于一个很小的区间内, 这正是“小波”名称的来由. 实际上, 也只有迅速衰减的小波才使变换(2)式具备局部化的特征.

设空间窗的中心为 x_c , 宽度为 $\Delta\omega$, 在空域中的处理就局限于以 $b + ax_c$ 为中心, 宽度为 $2a\Delta\omega$ 空间窗内进行; 在频域中, 设 $H(\nu)$ 的中心频率为 ν_c , 频率窗的宽度为 ΔW , 在频域中的处理局限于以 ν_c/a 为中心, 宽度为 $2\Delta W/a$ 的频率窗内进行.

这一处理过程有两个特点:

(1) 空间窗宽度 $a\Delta\omega$ 和频率窗宽度 $\Delta W/a$ 均随 a 的变化而变化, 窗的面积 $\Delta\omega\Delta W$ 与 a 无关.

(2) 中心频率 ν_c/a 与带宽(即频率窗宽)之比

$$Q = \frac{\nu_c/a}{\Delta W/a} = \frac{\nu_c}{\Delta W}$$

与中心频率大小无关, 仅取决于 $H(\nu)$. Q 是测量精确的特征量, 上式表明小波变换的测量精度与频率无关. 当中心频率 ν_c/a 增大时 (a 减小), 频率窗自动变宽, 使小波变换作为一个检测过程, 在不同频率下具有相同的精度; 反之, 当中心频率减小时 (a 增大), 空间窗自动加宽, 以容纳同样数目的信号空间周期. 有人把小波变换的这种性能比喻为“自动变焦”(zooming), 参见图 5. 伸缩因子 a 常称为小波变换的频率变量, 位移因子 b 则称为坐标变量.

进一步讲, 我们可以根据不同的用途, 选择不同形式的小波作为变换的基函数, 形成具备不同特征的小波变换. 因此, 小波变换与傅里叶变换在形式上和实质上都有了很大的差别.

小波变换是近年来发展很快的新兴学科, 应用非常广泛, 特别是在信号和图像处理领域中不断获得成功, 包括信号的分解、重构、滤波、特征识别、边缘检测、语音信息处理、地震勘探信息处理、无损探测信息处理等; 在数学领域中也有重要的应用^[6]. 下面我们介绍小波变换在边缘探测和光学图像识别中的应用.

4 小波变换与边缘探测

图形的重要特征之一是它的轮廓. 为了识别某一特定的图形, 往往只须认定它的轮廓, 而并不一定要研究它的内部细节. 轮廓是图形的边缘, 一旦图形的边缘被清晰地勾画出来, 这一图形就容易识别了. 在光学图像和光学信号处理中, 边缘探测还有许多其他应用.

相对于图形整体而言, 边缘显然是局部, 因此我们期望小波变换在边缘探测中有特殊的功效.

下面我们来研究用哈尔-高斯(Haar-Gaussian)小波变换来实现边缘探测的例子, 宋菲君等应用这一变换成功地进行了大规模集成电路管脚三维空间位置的精确测量^[5].

图 7(a)-(c) 给出宽度不同的边缘, 其中边缘(c)的函数图形上叠加了两种正弦噪声和随机噪声. 边缘是两个区域的交界, 数学上, 边缘函数表现为函数的奇点或突变, 但从物理上看, 边缘是两个区域的过渡带, 在图中用渐变的曲线表示, 同时画上了哈尔-高斯型小波, 并适当选取小波的伸缩因子 a , 使小波的空间窗宽度(图中用虚线表示)与边缘相匹配.

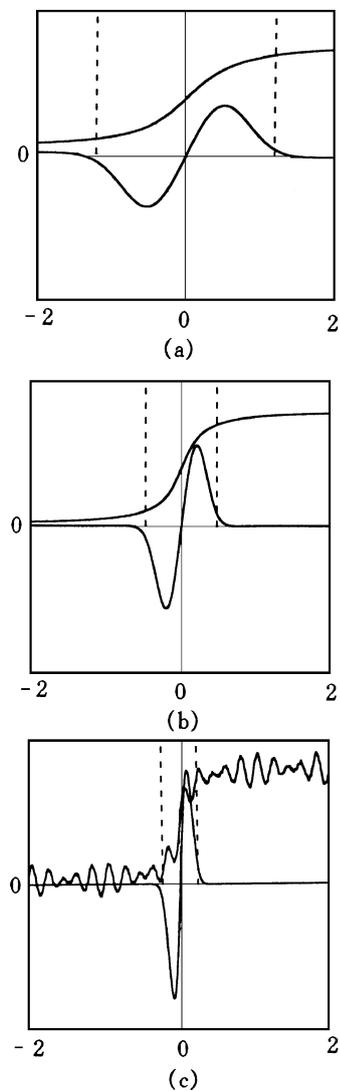


图 7 边缘函数和哈尔-高斯型小波 (虚线为空间窗)

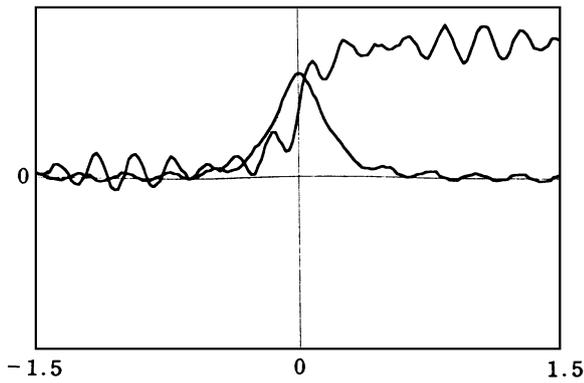
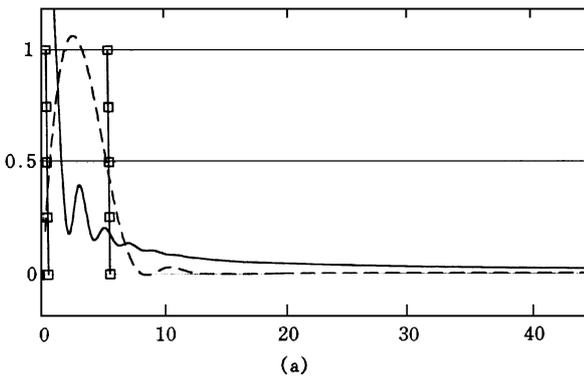
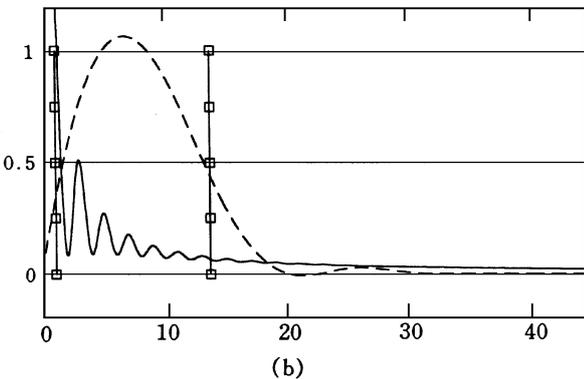


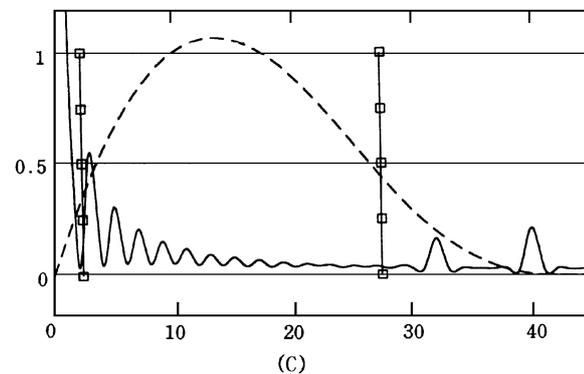
图8 用哈尔-高斯小波变换实现边缘



(a)



(b)



(c)

图9 频域行为
(虚线为小波频谱,带方框线为频率窗)

图8给出与图7(c)对应的小波变换,尽管边缘叠加了很大的噪声,小波变换仍然正确地指示了边缘的位置,变换函数的信噪比很高,说明小波变换有很强的抗干扰性。

研究一下小波变换在频域中的行为是很有意思的.图7中各边缘函数的空间频谱[由图9(a)一(c)表达]均由一个很强的零频和甚低频主峰、一系列振荡的旁瓣和延伸的本底形成.构成边缘行为的空频成分显然是旁瓣,而小波变换的空间频谱的高斯型主要部分所对应的频率窗恰恰覆盖了边缘频谱的旁瓣,对主峰的贡献很小.这样一来,在频域中小波变换侧重于处理由旁瓣所荷载的边缘信息,在空域中则正确指示了边缘的位置.当边缘的宽度变小时,它的频带向高端移动并加宽,高频分量更丰富.而小波变换的频率窗自动展宽,仍然包含了主要的旁瓣,充分表现了小波变换在局部处理方面的优越性。

值得一提的是,两种干扰信号的主频 ν_1 、 ν_2 位于频率窗外,对变换没有贡献;而随机本底噪声的谱是宽带的,对结果的影响也不大.说到底,在空域中干扰信号和随机本底都是“全局”信号,小波变换的局部处理手续恰恰抑制了它们的作用,而突出了图形的局部变化——边界的贡献。

5 光学小波变换匹配滤波器在图像识别中的应用

所谓图像识别或特征识别,指的是从大量信息或背景中检测某一特定的图形或指定的特征信息,并排斥其他图形信息.在一般情况下,我们只知道需要检测的图形的特征.对于其他图形的特征,我们事先可能并不知道,或知之甚少,但检测系统必须排斥这些图形.图像识别系统的这种性能称为“排它性”.光学小波变换识别系统在这方面的性能比常规的相关识别系统更强,因此有可能利用这一效应设计有应用价值的小波变换图像识别系统。

Li等^[2]给出一个用常规的匹配滤波器及小波变换匹配滤波器进行图形识别的结果(见图10).图10(a)是输入图像,其中右上角的字E是待识别的目标;图10(b)为常规的匹配滤波系统的相关输出,我们看到除了指示目标的相关峰以外,其他次峰也相当强,容易造成错判;图10(c)和(d)为小波变换的相关输出,信噪比远高于常规的图形识别。

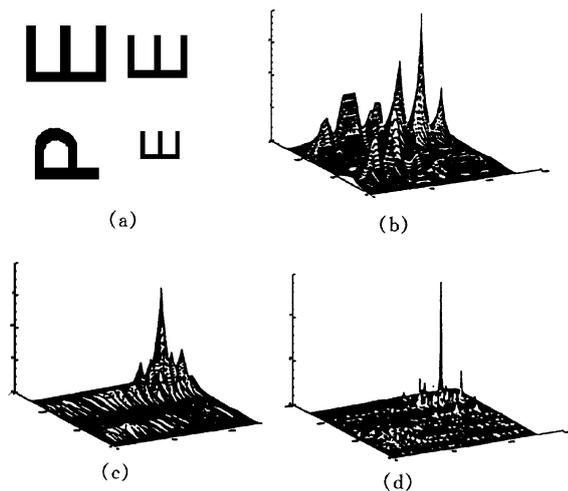


图 10 常规匹配滤波与小波变换匹配滤波图形识别^[2]

(a)输入图像,右上角的字 E 是待识别的目标;(b)常规的匹配滤波系统的相关输出;(c),(d)小波变换匹配滤波系统的相关输出

参 考 文 献

- [1] Chui C K. An Introduction to Wavelet, San Diego, Academic, 1992.
- [2] LI Y, Szu H H, Sheng Y *et al.* Proc. IEEE,1996,84:720—733
- [3] Sheng Y, Roberge D, Szu H H. Opt. Eng., 1992, 31: 1840—1845
- [4] Yu F T S, Lu G. Appl. Opt., 1994, 33: 5262—5270
- [5] Song F, Yu L, Jutamulia S. Opt. Memory and Neural Network, 1999, 2(8): 67—74
- [6] 汪富泉, 李后强. 物理, 1994, 23: 539—543 [WANG Fu Quan, LI Hour Qiang. Physics, 1994, 23: 539—543 (in Chinese)]
- [7] Yang X, Szu H H, Sheng Y *et al.* Opt. Eng., 1992, 31: 1852—1858

(上接第 173 页)

产物的探测、重建以及 K_L 衰变位置的确定。它采用轻工作气体(90%氦+10%异丁烷)和轻金属铝场丝,以减小在 CTC 中的再生,多次散射,并增加对光子的透明性。电磁量能器(EMC)模块由直径 1 mm 的蓝色闪烁光纤均匀地镶嵌在铅块中构成,光电倍增管同时记录能量和粒子到达时间。 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 衰变长度的测量精度达到 0.6 cm。KLOE 采用 0.6 T 场强的超导磁场,兼顾了优良的本底排除和探测性能。

4 结束语

DAΦNE 以其高亮度、高产率成为 ϕ , K 以及 ρ, η 和 η' 介子的“工厂”,以 K 介子系统的 CP 和 CPT 对称性研究为主要物理目标的 KLOE 实验,将以其显著的优势开展许多有意义的物理课题研究,并把 CP 破坏的测量提高到一个新水平。

参 考 文 献

- [1] Vignola G. Proc. of the Workshop on Physics and Detector for DAΦNE, Pancheri G ed. 1991. 1
- [2] KLOE Collaboration. KLOE, A General Purpose Detector for DAΦNE, Preprint LNF-92/01, April 1, 1992
- [3] Christenson J H, Cronin J W, Fitch V L *et al.* Phys. Rev. Lett., 1964, 13: 138
- [4] Particle Data Group. Review of Particle Properties, The European Physical Journal C, 1998, 3: 107
- [5] Wolfenstein L. Phys. Rev. Lett., 1964, 13: 562; Wolfenstein L. Nucl. Part. Phys., 1994, 21: 275
- [6] Lee-Franzini J. Status of DAΦNE and KLOE, In: Maiani L *et al.* eds. The Second DAΦNE Physics Handbook, LNF, 1995, 761—805
- [7] Barr G *et al.* (NA31 Collaboration). Phys. Lett., 1993, B317: 233
- [8] Barker A *et al.* (E731 Collaboration). Phys. Rev. Lett., 1993, 70: 1203
- [9] For all References on CHPT, See DAΦNE Physics Handbook, Maiani L *et al.* ed. LNF
- [10] Bartalucci S *et al.* Nuovo Cimento, 1979, 49A: 207