

# 应用计算全息制作的子波匹配滤波器 实现光学子波变换的研究\*

陈鹤鸣 贾小兵 施伟华

(南京邮电学院物理教研室, 南京 210003)

**摘 要** 介绍了一种应用计算全息制作的子波匹配滤波器实现光学子波变换的新方法, 应用计算全息制作 Haar 子波函数的匹配滤波器和光学 Vander Lugt 相关器实现了二维子波变换, 给出了实验结果。这种方法可实现任意子波函数的光学子波变换, 且简单易行。

**关键词** 子波匹配滤波器, 计算全息, 光学子波变换。

## 1 引 言

在信号分析和处理中, 傅里叶变换是常用的数学分析方法, 但是, 傅里叶变换只能获得信号的整个频谱, 而不能获得信号的局部特性, 为此, 科学工作者引入了短时傅里叶变换以及后来的子波变换<sup>[1, 2]</sup>。子波变换的基本思想与傅里叶变换类似, 就是用一簇函数去表示一信号, 这一簇函数具有一个显著的特点, 那就是函数是通过一基本母子波函数的不同尺度的平移和伸缩构成的<sup>[3]</sup>, 因此, 子波变换不仅具有傅里叶变换的所有优点, 而且它还具有处理短暂和瞬变信号的独特能力。目前, 它已广泛应用于图像处理、语音信号分析、模式识别和数据压缩等领域<sup>[4-7]</sup>。

由于子波变换使输出信号的维数倍增, 造成数据量扩大, 因此即使是“快速”子波变换, 其数字化算法也将是极慢的<sup>[8]</sup>。而光学运算具有并行、快速、容量大和抗干扰能力强的优点, 所以用光学方法实现子波变换具有很大的潜力, 不少科学工作者做了一定的研究<sup>[6, 7]</sup>。本文提出用计算全息技术制作 Haar 子波函数的匹配滤波器, 在光学 Vander Lugt 相关器中实现二维 Haar 子波变换。文中进行了简单的理论分析, 给出了实验结果, 实验结果与文献<sup>[9]</sup>给出的结果完全一致。

## 2 二维光学子波变换

在空域中, 二维信号  $s(x, y)$  的子波变换为<sup>[10, 11]</sup>

$$W(a_x, a_y, b_x, b_y) = \iint s(x, y) h_{a, b}^*(x, y) dx dy. \quad (1)$$

\* 邮电部中青年教师科学基金资助课题。

收稿日期: 1997-08-23; 收到修改稿日期: 1998-04-02

式中  $h_{a,b}(x, y)$  为二维子波函数, 它由基本母子波函数  $h(x, y)$  通过不同尺度的伸缩因子  $a [= (a_x, a_y)]$  和平移因子  $b [= (b_x, b_y)]$  构成,

$$h_{a,b}(x, y) = \frac{1}{(a_x a_y)^{1/2}} h\left(\frac{x - b_x}{a_x}, \frac{y - b_y}{a_y}\right). \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式可得

$$W(a_x, a_y, b_x, b_y) = \frac{1}{(a_x a_y)^{1/2}} \iint s(x + b_x, y + b_y) \times h^*\left(\frac{x}{a_x}, \frac{y}{a_y}\right) dx dy = \frac{1}{(a_x a_y)^{1/2}} s(x, y) \otimes h^*\left(\frac{x}{a_x}, \frac{y}{a_y}\right) \quad (3)$$

上式表明, 子波变换实质上就是输入信号  $s(x, y)$  和子波函数  $h_{a,b}(x, y)$  的卷积运算。

在频域中(3)式可写为:

$$W(a_x, a_y, b_x, b_y) = \iint S(\mu, \nu) H^*(a_x \mu, a_y \nu) \exp[j(2\pi\mu b_x + 2\pi\nu b_y)] d\mu d\nu \quad (4)$$

式中  $S(\mu, \nu)$ ,  $H^*(a_x \mu, a_y \nu)$  分别为信号  $s(x, y)$  和子波函数  $h_{a,b}(x, y)$  的傅里叶变换。上式表明, 二维子波变换也可以通过子波匹配滤波器  $H^*(a_x \mu, a_y \nu)$  和光学相关器来实现, 因此, 只要能制得子波匹配滤波器  $H^*(a_x \mu, a_y \nu)$ , 就可用光学 Vander Lugt 相关器实现二维子波变换。

### 3 Haar 子波匹配滤波器的制作

二维 Haar 子波函数可表示为:

$$h(x, y) = \text{rect}(x \pm 0.5, y \pm 0.5) - \text{rect}(x \pm 0.5, y \mp 0.5) \quad (5)$$

它是由两对双极性 2-D 矩形函数交错组成。本文采用计算全息技术制作 Haar 子波匹配滤波器, 首先将  $h(x, y)$  进行抽样, 然后将其抽样值进行快速傅里叶变换, 得到  $H^*(a_x \mu, a_y \nu)$ ,

应用罗曼 III 型迂回位相编码方法进行编码, 最后用激光打印机(HP Laser Jet 4)描出计算全息样品, 为了制作高质量的 Haar 子波匹配滤波器, 在计算全息程序中采用了误差综合修正<sup>[12]</sup>, 计算全息样品大小为 18 cm × 18 cm, 抽样点数为 125 × 125, 经缩微后 Haar 子波匹配滤波器的大小为 2 mm × 2 mm。图 1 为 Haar 子波匹配滤波器的计算全息样品。

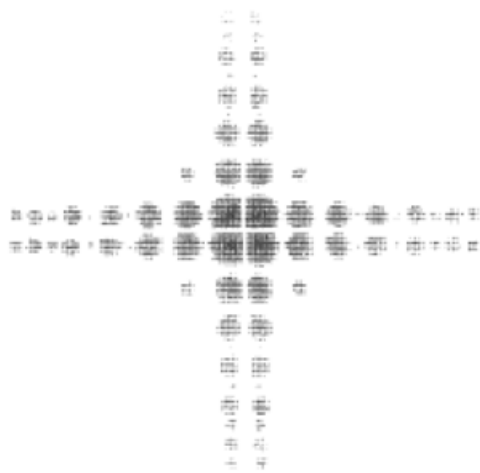


Fig. 1 The CGH's sample ( Haar Wavelet Filter)  $a_x = 1/4, b_x = b_y = 0$ .

子波函数的伸缩比例可通过改变光学 4f 系统中第一个傅里叶变换透镜的焦距来实现, 或在制作子波函数匹配滤波器时在同一张计算全息图中编码几个不同伸缩比例的子波函数, 实验中所用 Haar 子波函数的  $a_x =$

### 4 实验结果和讨论

实验所用的光学 Vander Lugt 相关器如图 2 所示, 图中 S 为光源, 它是 He-Ne 激光器, 它的工作波长为 632.8 nm, 输出功率为 1.5 mW,  $L_1$  为准直透镜,  $L_2$ 、 $L_3$  为傅里叶变换透镜, 它们的焦距为 302 mm,  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  分别为输入面、频谱面和输出面。激光器发出的激光

经扩束准直后射到输入面  $P_1$  上, 在  $P_1$  面上放置输入物体字母 T, 它的大小为  $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ , 该字母 T 经第一个傅里叶变换透镜  $L_2$  变换后, 在频谱面  $P_2$  上得到字母 T 的频谱, 同时在  $P_2$  面上放置由计算全息制得的 Haar 子波匹配滤波器, 这样, 在  $P_2$  面上得到字母 T 的频谱和 Haar 子波的频谱的乘积  $S(\mu, \nu)H^*(a_x\mu, a_y\nu)$ , 这个乘积经第二个傅里叶变换透镜  $L_3$  的变换, 在输出面  $P_3$  上的一级衍射光中得到字母 T 的子波变换, 该子波变换信号经 CCD 接收, 最后显示在监视器上。

图 3(a) 为输入物体字母 T, 图 3(b) 为其经子波变换后的实验结果, 从图 3 中可看出, 字母 T 的角特征得到了抽取, 该结果与文献[9]基本一致。

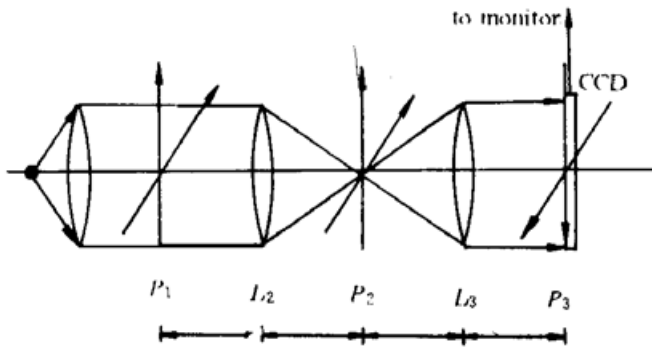


Fig. 2 Vander Lugt optical correlator. S: source;  
P's: planes; L's: lenses

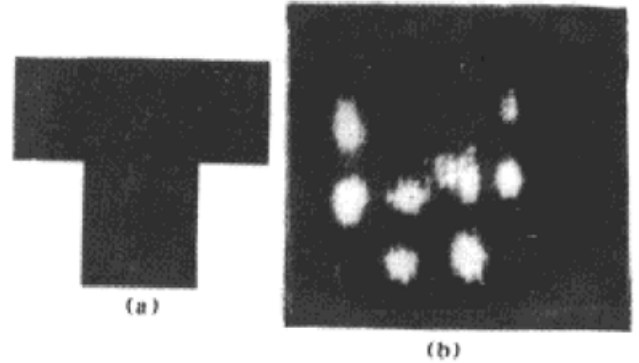


Fig. 3 Experimental results for corner detection.  
(a) input images, (b) optical WT results  
obtained by CGH's matched filtering

实验结果表明, 本文所提出的采用计算全息制作子波匹配滤波器和光学 Vander Lugt 相关器实现二维子波变换的方法是简便可行的。该方法的主要优点是可以制作任意函数形式的子波匹配滤波器, 实现子波变换。

### 参 考 文 献

- [1] S. Mallat, A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1989, **11**(7): 674~ 693
- [2] O. Rioul, M. Vetterli, Wavelets and signal processing. *IEEE Signal Proc. Mag.*, 1991, **8**(4): 14~ 38
- [3] M. O. Freeman, Wavelets, signal representations with important advantages. *Opt. Photon. News*, 1993, **4**(8): 8~ 14
- [4] R. Wilson, A. D. Calway, E. R. S. Pearson, A generalized wavelet transform for Fourier analysis: the multiresolution Fourier transform and its application to image and audio signal analysis. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 1992, **IT-38**(7): 674~ 690
- [5] J. Daugman, Complete discrete 2-D Gabor transforms by neural networks for image analysis and compression. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* 1988, **36**(11): 1169~ 1179
- [6] Special section on wavelet transforms. *Opt. Eng.*, 1992, **31**(9): 1823~ 1916
- [7] Special Section on applications of limited-extent waves. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(23): 5239~ 5307
- [8] H. Szu, H. J. Caulfield, Wavelet transform. *Opt. Engng.*, 1991, **31**(9): 1823~ 1824
- [9] 康辉, 许剑, 战元龄等, 利用光折变全息术实现的光学子波变换. *中国激光*, 1996, **23**(8): 741~ 744
- [10] Y. Sheng, T. Lu, D. Roberge, H. J. Caulfield, Optical  $N^4$  implementation of a two-dimensional wavelet transform. *Opt. Eng.*, 1992, **31**(9): 1859~ 1864
- [11] I. Ouzieli, D. Mendlovic, Two-dimensional wavelet processor. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(29): 5839~ 5846
- [12] 陈鹤鸣, 杜建昌, 杨大容, 计算全息的误差综合修正. *南京邮电学院学报*, 1991, **11**(2): 79~ 83

## Optical Wavelet Transform Using Computer-Generated Wavelet Matched Filter

Chen Heming    Jia Xiaobin    Shi Weihua

(*Section of Physics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003*)

(Received 23 August 1997; revised 2 April 1998)

**Abstract** A Haar wavelet transform with a Vander Lugt optical correlator is described. Optical Haar wavelet matched filter is created by using of computer-generated holography (CGH's). Experimental results for 2-D wavelet transform are obtained. The main advantage of the proposed method lies in that any types of wavelet matched filters can be fabricated and their 2-D wavelet transform can be realized.

**Key words** wavelet matched filter, computer-generated holograms, optical wavelet transform.