

文章编号: 0258-7025(2003)02-0149-05

# 位相编码振幅调制联合变换相关器的设计

袁祥岩, 陶纯堪, 于大勇, 卞松龄

(南京理工大学电光学院 432 教研室, 江苏 南京 210094)

**摘要** 采用位相编码技术减小了经典联合变换相关器中的直流分量, 及多目标输入时各目标图像之间的互相关项, 并且同时消除了参考图像和各目标图像之间的共轭相关项。通过对联合功率谱进行振幅调制, 缩小了相关峰的宽度, 锐化了相关峰, 增强了识别能力。最后给出了计算机模拟结果。

**关键词** 图像处理; 联合变换相关器; 位相编码; 联合功率谱; 振幅调制

中图分类号 O 438 文献标识码 A

## Phase-encoded Joint Transform Correlator by Use of Amplitude-modulation

YUAN Xiang-yan, TAO Chun-kan, YU Da-yong, BIAN Song-ling

(NanJing University of Science and Technology, Electronic and Optical School, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** Using phase-encoded technique, the proposed joint transform correlator reduces greatly the strong dc component and cross-correlations between each input target, and the conjugate cross-correlation between the reference and input targets, which are existing in the classical joint transform correlator. All these achievements are accomplished in only one step. With the use of amplitude modulation, the correlation output is bettered greatly in terms of correlation width, correlation peak sharpness, and anti-noise ability. At the end, computer simulation is given which proved the efficiency of the proposed method.

**Key words** image processing; joint transform correlator (JTC); phase-encoding; joint power spectrum (JPS); amplitude modulation

## 1 引言

匹配空间滤波(MSF)和联合变换相关(JTC)是实现光学模式识别的两种基本方法。匹配空间滤波法需要根据具体的识别任务, 提前制作好匹配滤波器, 识别时要求滤波器的中心与输入待识别物体的频谱面中心严格重合, 否则识别率会显著下降。与匹配滤波法相比, 联合变换相关器不存在制作复匹配滤波器及其严格的复位问题, 易于实现光学相关识别的实时处理。

但由于联合变换的目标图像和参考图像是同时显示在输入面的空间光调制器(SLM)上, 根据联合变换相关原理, 经典联合变换相关器存在两个方面的弱点: 一方面, 由于联合变换相关存在较强的零衍射级, 从而使输出面中相关输出的衍射效率较低, 它

影响相关峰的探测; 另一方面, 联合变换相关输出面中零级衍射峰的宽度很大, 限制了其输入面的目标图像和参考图像的大小和相对位置, 降低了对输入面空间带宽积的使用。

为了削弱或去除零衍射级, 提高联合变换相关的图像识别能力, 提出了许多解决方案。功率谱二值化<sup>[1~3]</sup>: 对不含噪声的单目标输入图像, 这种方法有非常好的相关性能, 但在多目标输入时, 二值化操作引入的多谐波项输出会产生假相关信号, 从而加大了识别的复杂性。直流阻塞法<sup>[4]</sup>: 通过在联合功率谱面的中心放置一个不透明孔来阻塞直流分量, 这种方法简单易操作, 但当输入图像被噪声污染时, 零级项变得很复杂, 直流阻塞的方法就失去了效用。频谱面相减<sup>[5,6]</sup>: 分别将参考物体和输入图像置于

收稿日期: 2001-12-10; 收到修改稿日期: 2002-01-21

作者简介: 袁祥岩(1976—), 女, 南京理工大学电光学院, 博士生, 主要从事光电信息及混合图像的处理和光学模式识别的研究。E-mail: yxplease@yahoo.com.cn

空间光调制器上,记录各自的功率谱,用联合功率谱减去上面记录的两项功率谱,从而去除直流项。相关面相减<sup>[7]</sup>:将减法操作移至相关面上进行,相关过程中不介入计算机处理,因此比频谱面相减的执行速度更快。但两种方法都需多步操作才能实现。功率谱相移法<sup>[8]</sup>:需要通过半波片将参考图像取反和功率谱相减实现。条纹调制滤波法<sup>[9]</sup>:用参考图像的功率谱制作滤波器(可以通过计算机提前制作),

实现了实时性,但在多目标输入时,识别能力下降,而且抗噪声能力不强。振幅调制滤波法<sup>[10]</sup>:在多目标输入时,对增强高频分量和抗噪声能力方面都明显优于条纹调制滤波法。因此本文采用位相编码和振幅调制滤波的方法,只需一步就锐化了直流相关峰,缩小了相关宽度,消除了多目标输入时各目标图像之间的互相关项和参考图像与各目标图像之间的共轭相关项,并且具有很强的抗噪声能力。

## 2 位相编码原理

设参考图像  $r(x, y + y_0)$  和目标图像为  $t_1(x - x_1, y - y_1), t_2(x - x_2, y - y_2), \dots, t_n(x - x_n, y - y_n)$ , 则联合输入可表示为

$$f(x, y) = r(x, y + y_0) + \sum_{i=1}^n t_i(x - x_i, y - y_i)$$

联合傅里叶变换为

$$F(u, v) = |R(u, v)| \exp[j\phi_r(u, v) + jvy_0] + \sum_{i=1}^n |T_i(u, v)| \exp[j\phi_{t_i}(u, v) - jux_i - jvy_i]$$

联合功率谱为

$$\begin{aligned} |F(u, v)|^2 &= |R(u, v)|^2 + \sum_{i=1}^n |T_i(u, v)|^2 + \\ &2 \sum_{i=1}^n |T_i(u, v)| |R(u, v)| \cos[\phi_{t_i}(u, v) - \phi_r(u, v) - ux_i - v(y_i + y_0)] + \\ &2 \sum_{\substack{i=1 \\ k \neq i}}^n \sum_{k=1}^n |T_i(u, v)| |T_k(u, v)| \cos[\phi_{t_i}(u, v) - \phi_{t_k}(u, v) - ux_i + ux_k - vy_i + vy_k] \end{aligned}$$

$(u, v)$  为空间频率坐标,以  $2\pi/\lambda f$  标度。 $|R(u, v)|$  和  $|T_i(u, v)|$  分别为参考图像和目标的傅里叶变换的振幅,  $\phi_r(u, v)$  和  $\phi_{t_i}(u, v)$  为各自频谱的位相。对联合功率谱进行逆傅里叶变换就得到相关输出。上式的前两项产生零级自相关输出,最后一项产生各输入图像之间的互相关,只有第三项为识别所需的互相关项,其他的均为无用信号或干扰项。如果让干扰项(上式的第 1, 2, 4 项)与一个位相随机分布的滤波器相乘,则干扰信号的能量将会散布于各个方向,从而增强了有用互相关信号。为了实现以上设想,在输入目标的频谱面上放置一个位相在  $[-\pi, \pi]$  之间随机分布的膜片<sup>[10, 11]</sup>

$$\Phi(u, v) = \exp[j\psi(u, v)] \quad (1)$$

则目标的频谱变为

$$\sum_{i=1}^n |T_i(u, v)| = \exp[\phi_{t_i}(u, v)] \exp(-jux_i - jvy_i) \times \Phi(u, v) \quad (2)$$

这相当于将输入目标图像与函数  $\phi(x, y)$  ( $\Phi(u, v)$  的逆傅里叶变换) 进行卷积,将卷积后的图像作为新的目标输入,则新的联合输入图像为

$$f(x, y) = r(x, y + y_0) + \sum_{i=1}^n t_i(x - x_i, y - y_i) \otimes \phi(x, y) \quad (3)$$

联合功率谱为

$$\begin{aligned} |F(u, v)|^2 &= |R(u, v)| \exp[j\phi_r(u, v) + jvy_0] + \sum_{i=1}^n |T_i(u, v)| \exp[j\phi_{t_i}(u, v) - jux_i - jvy_i] \times \Phi(u, v) \quad (3) \\ &= |R(u, v)|^2 + \sum_{i=1}^n |T_i(u, v)|^2 + \\ &\sum_{i=1}^n |R(u, v)| |T_i(u, v)| \exp[j\phi_r(u, v) - j\phi_{t_i}(u, v) + jux_i + jv(y_0 + y_i)] \times \Phi^*(u, v) + \\ &\sum_{i=1}^n |R(u, v)| |T_i(u, v)| \exp[-j\phi_r(u, v) + j\phi_{t_i}(u, v) - jux_i - jv(y_0 + y_i)] \times \Phi(u, v) + \end{aligned}$$

$$2 \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |T_i(u, v)| |T_k(u, v)| \cos[\phi_{\bar{i}}(u, v) - \phi_{\bar{k}}(u, v) - u(x_i - x_k) - v(y_i - y_k)] \quad (4)$$

为了消除随机位相对有用互相关项的调制,同时加强对诸干扰项的调制,将联合功率谱乘上相同的位相滤波器,得

$$\begin{aligned} O(u, v) = & [|R(u, v)|^2 + \sum_{i=1}^n |T_i(u, v)|^2] \times \Phi(u, v) + \\ & \sum_{i=1}^n |R(u, v)| |T_i(u, v)| \times \exp[j\phi_r(u, v) - j\phi_{\bar{i}}(u, v) + jux_i + jv(y_0 + y_i)] + \\ & \sum_{i=1}^n |R(u, v)| |T_i(u, v)| \times \exp[-j\phi_r(u, v) + j\phi_{\bar{i}}(u, v) - jux_i - jv(y_0 + y_i)] \times \Phi(u, v) \times \Phi(u, v) + \\ & 2 \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |T_i(u, v)| |T_k(u, v)| \cos[\phi_{\bar{i}}(u, v) - \phi_{\bar{k}}(u, v) - u(x_i - x_k) - v(y_i - y_k)] \times \Phi(u, v) \end{aligned} \quad (5)$$

由(5)式可以看出,直流项、输入目标之间的互相关项和参考图像与目标之间的共轭相关项分别受到了随机位相的调制,故其能量将向各个方向分散。只有有用的互相关信号不受调制,从而产生显著的相关峰。

### 3 振幅调制原理

联合功率谱的高频部分包含了很重要的信息,但其相对能量很弱。因此加强高频分量的能量可以显著提高相关性能。振幅调制滤波器为

$$H_{\text{AMF}}(u, v) = \begin{cases} TH/|R(u, v)|^2, & |R(u, v)|^2 \geq TH \\ 1, & |R(u, v)|^2 < TH \end{cases}$$

$TH$  是预先确定的阈值,  $|R(u, v)|^2$  为参考图像的功率谱。振幅调制后的联合功率谱为

$$\text{AMJPS}(u, v) = H_{\text{AMF}}(u, v) \cdot O(u, v) \quad (6)$$

以下仅考虑联合功率谱中的有用相关项,即(5)式中的第三项

$$\begin{aligned} \text{AMJPS}(u, v) \approx & H_{\text{AMF}}(u, v) \cdot \sum_{i=1}^n |R(u, v)| |T_i(u, v)| \times \\ & \exp\{j[\phi_r(u, v) - \phi_{\bar{i}}(u, v)] + jux_i + jv(y_0 + y_i)\} \end{aligned}$$

当  $|R(u, v)|^2 \geq TH$  时

$$\text{AMJPS}(u, v) = TH \sum_{i=1}^n \frac{|T_i(u, v)|}{|R(u, v)|} \exp\{j[\phi_r(u, v) - \phi_{\bar{i}}(u, v)] + jux_i + jv(y_0 + y_i)\} \quad (7)$$

设  $t_1(x - x_1, y - y_1)$  和  $t_2(x - x_2, y - y_2)$  与  $r(x, y + y_0)$  相同,则

$$\begin{aligned} \text{AMJPS}(u, v) = & TH \exp\{j[ux_1 + v(y_0 + y_1)]\} + TH \exp\{j[ux_2 + v(y_0 + y_2)]\} + \\ & TH \sum_{i=3}^n \frac{|T_i(u, v)|}{|R(u, v)|} \exp\{j[\phi_r(u, v) - \phi_{\bar{i}}(u, v)] + jux_i + jv(y_0 + y_i)\} \end{aligned} \quad (8)$$

(8) 式中的前两项将产生脉冲似的相关输出,表示输入图像中的真实目标与参考图像的互相关输出,最后一项是表示输入图像中的假目标与参考图像的互相关。由上式可以看出,自相关峰输出(对应于(8)式的前两项输出)是一  $\delta$  函数,而互相关功率谱(对应于(8)式中第三项)同时存在振幅调制和位相不匹配的调制,故输出的互相关峰弥散,峰值很弱。在一些极特殊的情况下,也可能存在  $|T_i(u, v)| = |R(u, v)|$ , ( $i \neq 1, 2$ ), 比如输入和参考图像均为纯位相物体,但这种情况在通常的识别任务中很少见。

当  $|R(u, v)|^2 < TH$  时

$$\begin{aligned} \text{AMJPS}(u, v) = & \sum_{i=1}^n |R(u, v)| |T_i(u, v)| \exp\{j[\phi_r(u, v) - \phi_{\bar{i}}(u, v)] + jux_i + jv(y_0 + y_i)\} = \\ & |R(u, v)|^2 \exp\{j[\phi_r(u, v) - \phi_{\bar{1}}(u, v)] + jux_1 + jv(y_0 + y_1)\} + \\ & |R(u, v)|^2 \exp\{j[\phi_r(u, v) - \phi_{\bar{2}}(u, v)] + jux_2 + jv(y_0 + y_2)\} + \\ & \sum_{i=3}^n |R(u, v)| |T_i(u, v)| \exp\{j[\phi_r(u, v) - \phi_{\bar{i}}(u, v)] + jux_i + jv(y_0 + y_i)\} \end{aligned} \quad (9)$$

由(9)式可以看出,在高频区,自相关功率谱(对应于(9)式的前两项),由于 $|R(u,v)|$ 的值很小,可近似为常数,故自相关峰输出是一 $\delta$ 函数。而互相关功率谱,即假目标与参考图像的互相关(对应于(9)式中第三项),仍然存在位相不匹配的调制,故输出的互相关峰弥散,峰值很弱。

#### 4 计算机模拟

采用的参考图像和目标图像如图1,图2所示。左边的飞机为参考图像,输入图像中最右边的目标被噪声污染。采用位相编码技术产生的相关输出如图3所示。进行振幅调制之后的相关输出如图4所示。 $TH$ 取为参考图像功率谱最大值的万分之一。



图1 参考图像  
Fig. 1 Reference image

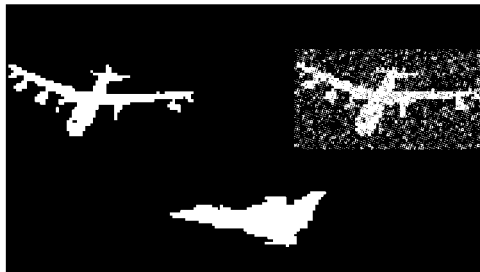


图2 多目标输入图像  
Fig. 2 Input image of multiple targets

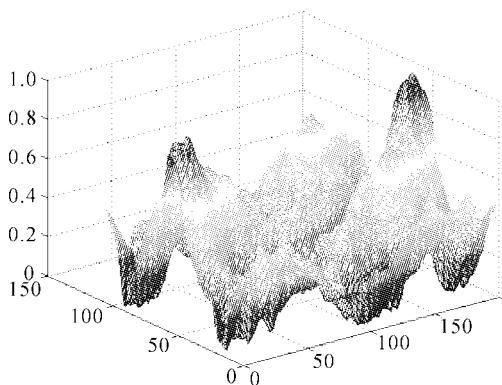


图3 位相编码得到的相关输出  
Fig. 3 Correlation output after phase-encoding

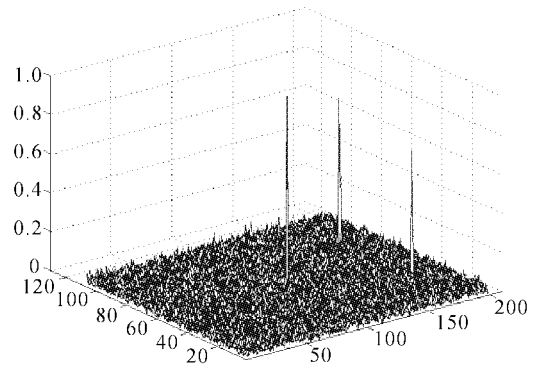


图4 位相编码和振幅调制后的相关输出  
Fig. 4 Correlation output after phase-encoding and amplitude-modulation

由图3可以看出,仅采用位相编码产生的相关结果,不利于直接判断。经过振幅调制之后,相关结果非常清晰,被噪声污染的目标也被正确地识别出来了。由于零级自相关项的强度很大,虽然受到了随机位相的调制,仍然有较强的峰值信号存在。共轭相关项由于受随机位相的平方调制(见式(5)),因此能量很弱。目标之间的互相关在随机位相的调制下,能量也很弱。

#### 5 拟采用的光学实现装置

实现位相编码振幅调制联合相关变换(AMFPEJTC)可采用的光学装置如图5所示。傅里叶变换透镜的焦距为100 mm,通光孔径为50 mm。空间光调制器SLM1,SLM2,SLM3均采用日本产P13VM125型透射式液晶电视,外形尺寸为38 mm×42 mm×4.3 mm,像素数为640×480,动态范围200:1。液晶光阀采用硒化镉交流液晶光阀,通光孔径为45 mm,分辨率为40线对/mm。摄像机采用PULNIX公司的TM-6710,像素数648×484,60帧/s,外形尺寸为46.3 mm×39.4 mm×140.8 mm。

输入的目标图像显示在空间光调制器SLM1上,经过傅里叶变换透镜 $L_2$ 后,在其后焦平面上得到目标频谱,焦平面上放置位相膜片(phase mask),目标频谱与位相膜片的乘积通过透镜 $L_3$ 后得到经位相编码的图像。参考图像由计算机送入SLM2,并通过成像透镜 $L_7$ 成像于BS2上。由位相编码后的图像和参考图像构成联合输入图像,通过傅里叶变换透镜 $L_4$ 得到位相编码的联合频谱,并记录在平方律探测器件LCLV上,紧靠LCLV的读出侧放置

相同的位相膜片(公式(5)),振幅调制滤波器(AMF)显示在SLM3上,用经过AMF的激光作为LCLV的读出光,从而得到振幅调制的位相编码联合功率谱,最后通过分光镜BS3和 $L_5$ 进行逆傅里叶变换产生相关输出。

由于随机位相膜片和振幅调制滤波器都与输入目标无关,故可以提前制作好,因此该系统可以实现

实时处理。目标图像和参考图像输入到不同的空间光调制器(SLM)上,确保了对空间带宽积的更好利用。最重要的是相关峰尖而窄,而且参考图像与每一个输入目标只产生一个相关峰,更有利于对目标位置的探测。

实验正在进行中,相关的实验结果将在后续的文章中给出。

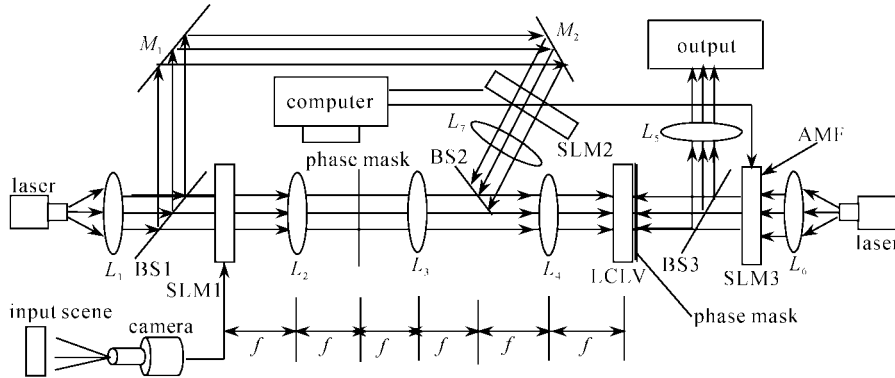


图5 位相编码振幅调制联合变换相关器结构图

Fig. 5 Diagram of AMFPEJTC

## 6 结 论

提出了一种新型的光电混合联合变换相关器,即位相编码振幅调制联合变换相关器。通过随机位相和振幅调制滤波器的共同作用,极大地提高了相关性能。只需一步就锐化了直流相关峰,缩小了直流相关宽度,消除了各输入目标之间的互相关项和参考图像与目标之间的共轭相关项,并且具有很强的抗噪声能力。

### 参 考 文 献

- 1 Bahram Javidi, Nonlinear joint power spectrum based optical correlation [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(12): 2358~2367
- 2 Ge Baozhen, Chen Ximing, Zhang Yimo *et al.*. Binary joint transform correlation with real-time adaptive thresholding [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(12):1107~1110 (in Chinese)
- 3 Bahram Javidi, Jun Wang, Qing Tang. Multiple-object binary joint transform correlation using multiple-level threshold crossing [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(29): 4234~4244
- 4 S. K. Rogers, J. D. Cline, M. Kabrisky *et al.*. New binarization techniques for joint transform correlation [J]. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(9):1088~1093
- 5 M. S. Alam, M. A. Karim. Multiple target detection using a modified fringe-adjusted joint transform correlator [J]. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(5):1610~1617
- 6 Chun-Te Li, Shizhuo Yin, Francis T. S. Yu. Nonzero-order joint transform correlator [J]. *Opt. Eng.*, 1998, **37**(1):58~65
- 7 Mohammad S. Alam, Dylan Chain. Efficient multiple target recognition using a joint wavelet transform processor [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(5):1203~1210
- 8 Chen Huaixin, Chen Zhenpei, Chen Xiaowei. Binary joint transform correlator subtracting a power spectrum based on a phase-shift technique [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(4):353~358 (in Chinese)
- 9 Xue-Wen Chen, Mohammad A. Karim, Mohammad S. Alam. Distortion-invariant fractional power fringe-adjusted joint transform correlation [J]. *Opt. Eng.*, 1998, **37**(1):138~143
- 10 Xianlie Huang, Hongkai Lai, Zehua Gao. Multiple-target detection with use of a modified amplitude-modulated joint transform correlator [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(35):9198~9204
- 11 Takanori Nomura. Phase-encoded joint transform correlator to reduce the influence of extraneous signals [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(17):3651~3655