第 17 卷 第 9 期 光 学 学 报 Vol. 17, No. 9
1997 年 9 月 ACTA OPTICA SINICA September, 1997

使用振幅调制和功率谱相减的联合变换相关器作多目标检测

赖虹凯 黄献烈 高泽华
(厦门大学物理学系, 厦门 361005)

摘 要 提出一种使用振幅调制和功率谱相减的联合变换相关器(JTC)作多目标检测。这一方法对联合功率谱作了修正, 先将联合功率谱减去纯输入景物的功率谱和参考图象的功率谱, 再将所得修正的联合功率谱(JIS)乘以振幅调制滤波(AMF)函数。分析和量化了输入景物噪声对联合变换相关器性能的影响。这种方法比条纹调节的联合变换相关器和修正的条纹调节的联合变换相关器能产生更好的相关输出和适应输入景物噪声的能力。

关键词 光学图像识别, 联合变换相关器, 多目标检测, 功率谱。

1 引 言

联合变换相关器[1]是光学图像识别的一种很常用的结构, 其主要优点是参考图像可以实时更新和不需要预先制造滤波器。但是经典的联合变换相关器存在大的相关宽度和低的光效率。而且在输出面上存在强的零级项, 它遮蔽了所期望的相关峰。这种情况在输入景物有噪声时变得更加严重, 使得检测输入目标位置的准确度降低。Javidi 等人[2]提出二元联合变换相关器, 它是在作逆傅里叶变换之前, 用硬削幅非线性对傅里叶平面上的联合功率谱作二元化, 使联合功率谱只具有+ 1 和- 1 两个值。二元联合变换相关器在相关峰强度、相关峰宽度和识别力方面都优于经典的联合变换相关器。然而, 二元联合变换相关器的计算工作量限制了系统的处理速度, 而且克服不了输出面中心大的零级项。特别是对多目标输入景物, 联合功率谱二元化处理会引入谐波相关峰, 导致识别误判, 使目标检测复杂化。

最近 Feng 等人[3]提出基于振幅调制滤波器的联合变换相关器, 它是在作逆傅里叶变换之前, 用振幅调制滤波器乘以联合功率谱。这种方法可以产生比二元联合变换相关器更好的相关性能。然而会出现一个或多个极性, 引起其它严重的问题。为了克服这一极性的问题, Alam 等人[4, 5]引入基于条纹调节滤波(FAF)的联合变换相关器, 它是用条纹调节滤波乘以修正的联合功率谱, 这修正的联合功率谱是将联合功率谱减去纯输入景物的功率谱得到的。这种方法可以产生比经典的联合变换相关器和二元联合变换相关器更好的相关输出, 但是它对输入景物的噪声是敏感的, 而且在输出面的中心仍然存在很强的零级项。为了使基于条纹调节滤波的联合变换相关器能适应输入景物存在严重噪声的情况. 最近 Wang 等人[6]提出基

收稿日期: 1997 年 1 月 18 日; 收到修改稿日期: 1997 年 3 月 14 日

于修正的条纹调节滤波(MFAF)的联合变换相关器，它是用修正的条纹调节滤波乘以修正的联合功率谱，这修正的联合功率谱是将联合功率谱减去纯输入景物的功率谱和参考图像的功率谱得到的。这种方法比基于条纹调节滤波的联合变换相关器对输入景物浸没在严重的噪声中能产生更好的结果，但是对输入景物的噪声不大时，相关性能仍然比基于条纹调节滤波的联合变换相关器差。而且系统中还得增加一空间光调制器(SLM)作二元纯位相补偿。

为了使联合变换相关器在输入景物中存在和不存在噪声的情况下都能有很好的相关输出性能，本文提出振幅调制和功率谱相减的联合变换相关器，这种方法是在作逆傅里叶变换之前，用振幅调制滤波乘以修正的联合功率谱。计算机模拟结果证实了所提出的方法是有效的。

2 分 析

实时振幅调制和功率谱相减的联合变换相关器如图 1 所示。其中参考图像和多目标输入景物通过空间光调制器 SLM_1 同时显示于输入平面。设 $r(x, y+y_0)$ 表示参考图像，$t(x, y)$ 表示含有几个物体 $t_1(x-x_1, y-y_1)$，$t_2(x-x_2, y-y_2)$，…，$t_n(x-x_n, y-y_n)$，的输入景物，$n(x, y-y_0)$ 表示输入景物的可加噪声，则输入联合图像可以表示为

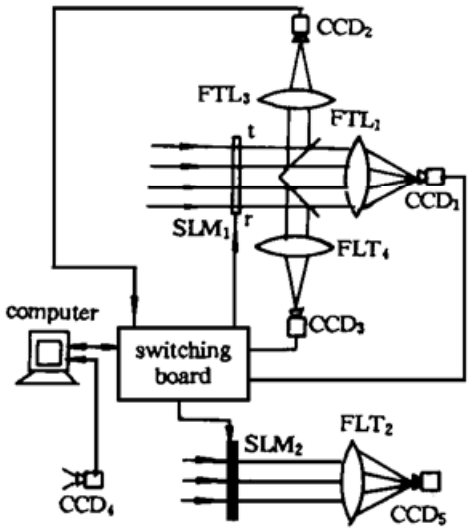

Fig. 1 Schematic diagram of a real time modified amplitude modulated JTC

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

透镜 L_1 作傅里叶变换，给出

$$F(u, v) = R(u, v)\exp(jvy_0) + \sum_{i=1}^{n} T_i(u, v)\exp(-jux_i - jvy_i) + N(u, v)\exp(-jvy_0) \tag{2}$$

式中 $R(u, v)$，$T_i(u, v)$ 和 $N(u, v)$ 分别为 $r(x, y)$，$t_i(x, y)$ 和 $n(x, y)$ 的傅里叶变换；u 和 v 为互相独立的频率域变量，以因子 $2\pi/\lambda f$ 标度，其中 λ 为准直光的波长；f 为傅里叶变换透镜 FTL_1 和 FTL_2 的焦距。联合功率谱即透镜 FTL_1 后焦面产生的复数光分布的强度，为

$$\begin{aligned}|F(u, v)|^2 = {} & |R(u, v)|^2 + \sum_{i=1}^{n}|T_i(u, v)|^2 + 2\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}|T_i(u, v)||T_k(u, v)| \\ & \times \cos[\phi_i(u, v) - \phi_k(u, v) - u(x_i - x_k) - v(y_i - y_k)] \\ & + 2\sum_{i=1}^{n}|R(u, v)||T_i(u, v)|\cos[\phi_r(u, v) - \phi_i(u, v) + ux_i + v(y_i + y_0)] \\ & + 2|R(u, v)||N(u, v)|\cos[\phi_r(u, v) - \phi_n(u, v) + 2vy_0] \\ & + 2\sum_{i=1}^{n}|T_i(u, v)||N(u, v)|\cos[\phi_i(u, v) - \phi_n(u, v) - ux_i - v(y_i - y_0)] \\ & + |N(u, v)|^2 \end{aligned} \tag{3}$$

其中 $i \neq k$，$|R(u, v)|$、$|T_i(u, v)|$ 和 $|N(u, v)|$ 分别为 $R(u, v)$、$T_i(u, v)$ 和 $N(u, v)$ 的振幅，$\phi_r(u, v)$、$\phi_i(u, v)$ 和 $\phi_n(u, v)$ 分别为它们的位相。

在经典的联合变换相关器中, 联合功率谱用透镜 FTL_2 作逆傅里叶变换产生相关输出。而在二元联合变换相关器中, 联合功率谱在作逆傅里叶变换之前, 应用硬削幅非线性先作二元化。从(3)式可以看出, 相关输出有以下几项: 参考图像与输入景物的物体的自相关、参考图像与输入景物的物体之间的互相关、与不同输入景物的物体之间以及各种噪声项的互相关。

如果输入景物存在多个相同的目标, 由于目标本身之间的自相关(相应于(3)式的第三项), 会产生虚假的相关峰。而且, 当输入景物浸没在严重的背景噪声中, 由于有害的噪声影响(相应于(3)式的最后三项), 仍然会引起很差的目标检测。为避免虚假的相关峰, 减少噪声影响, 可以采用功率谱相减的方法。在联合变换相关器的输入面上只显示输入景物而不显示参考图像, 并记录这一纯输入景物的功率谱。表示为

$$\begin{aligned}|I(u,v)|^2 = {} & \sum_{i=1}^{n}|T_i(u,v)|^2 + 2\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}|T_i(u,v)||T_k(u,v)| \\ & \times\cos[\phi_i(u,v) - \phi_k(u,v) - u(x_i - x_k) - v(y_i - y_k)] \\ & + 2\sum_{i=1}^{n}|T_i(u,v)||N(u,v)| \\ & \times\cos[\phi_i(u,v) - \phi_n(u,v) - ux_i - v(y_i - y_0)] + |N(u,v)|^2 \end{aligned} \tag{4}$$

其中 $i \neq k$。然后只显示参考图像, 产生功率谱 $|R(u,v)|^2$, 最后从(3)式表示的受噪声损害的联合功率谱减去纯输入景物的功率谱 $|I(u,v)|^2$ 和参考图像的功率谱 $|R(u,v)|^2$, 所得修正的联合功率谱可以表示为

$$\begin{aligned}P(u,v) = {} & |F(u,v)|^2 - |I(u,v)|^2 - |R(u,v)|^2 \\ = {} & 2\sum_{i=1}^{n}|R(u,v)||T_i(u,v)|\cos[\phi_r(u,v) - \phi_i(u,v) + ux_i + v(y_i + y_0)] \\ & + 2|R(u,v)||N(u,v)|\cos[\phi_r(u,v) - \phi_n(u,v) + 2vy_0] \end{aligned} \tag{5}$$

式中含有参考图像功率谱 $|R(u,v)|^2$ 的计算可以在作联合变换相关器运算之前完成。值得注意的是相减运算可以用光学的方法或图 1 所示的使用计算机的电子学方法。将(5)式与(3)式比较可以看出, 输入景物中的相同目标之间以及输入景物中的非目标(混杂信号)与目标之间所产生的虚假相关峰被除去, 在联合变换相关器中的噪声影响大大减少, 而且强的零级项也完全被除去。为了进一步提高联合变换相关器的相关性能和减少输入景物中噪声的影响, 可以采用振幅调制滤波函数乘以修正的联合功率谱((5)式), 其中振幅调制滤波函数的结构为

$$H_{amf}(u,v) = \begin{cases} TH/|R(u,v)|^2, & |R(u,v)|^2 \geqslant TH \\ 1, & |R(u,v)|^2 < TH \end{cases} \tag{6}$$

适当选择阈值 TH, 使参考图像的傅里叶变换的能量对系统的贡献趋于均匀。由(6)式可见, 振幅调制滤波器压低了低空间频率的贡献, 因为 $|R(u,v)|^2$ 集中大部分能量在低频而只有小部分能量的高频。经振幅调制和功率谱相减后的联合功率谱为

$$G(u,v) = H_{amf}(u,v)\,P(u,v)$$

当 $|R(u,v)|^2 \geqslant TH$ 时,

$$\begin{aligned}G(u,v) = {} & 2TH\sum_{i=1}^{n}[|T_i(u,v)|/|R(u,v)|]\cos[\phi_r(u,v) - \phi_i(u,v) + ux_i + v(y_i + y_0)] \\ & + 2TH[|N(u,v)|/|R(u,v)|]\cos[\phi_r(u,v) - \phi_n(u,v) + 2vy_0] \end{aligned} \tag{7}$$

当 $|R(u,v)|^2 < TH$ 时

$$G(u,v)=2\sum_{i=1}^{n}|R(u,v)||T_i(u,v)|\cos[\phi_r(u,v)-\phi_i(u,v)+ux_i+v(y_i+y_0)]$$
$$+2|R(u,v)||N(u,v)|\cos[\phi_r(u,v)-\phi_n(u,v)+2vy_0] \quad (8)$$

若输入景物中与参考图像 $r(x,y+y_0)$ 相同的目标有 $t_1(x-x_1,y-y_1)$，$t_2(x-x_2,y-y_2)$ 和 $t_3(x-x_3,y-y_3)$，则(7)式化为

$$G(u,v)=2TH\sum_{i=1}^{3}\cos[ux_i+v(y_i+y_0)]$$
$$+2TH\sum_{i=4}^{n}[|T_i(u,v)|/|R(u,v)|]\cos[\phi_r(u,v)-\phi_i(u,v)+ux_i+v(y_i+y_0)]$$
$$+2TH[|N(u,v)|/|R(u,v)|]\cos[\phi_r(u,v)-\phi_n(u,v)+2vy_0] \quad (9)$$

透镜 FTL_2 作 $G(u,v)$ 的傅里叶变换产生相关输出。由(9)式可以看出，第一项是多对 δ 函数，相应于输入景物中与参考图像 $r(x,y+y_0)$ 相同的多个目标；第二项为输入景物中非目标的影响；第三项为输入景物中噪声的影响，因为在低频处，$|R(U,v)|$ 值很大，所以第二、三项的影响较第一项为小。对同样的情况，(8)式化为

$$G(u,v)=2\sum_{i=1}^{3}|R(u,v)|^2\cos[ux_i+v(y_i+y_0)]$$
$$+2\sum_{i=4}^{n}|R(u,v)||T_i(u,v)|\cos[\phi_r(u,v)-\phi_i(u,v)+ux_i+v(y_i+y_0)]$$
$$+2|R(u,v)||N(u,v)|\cos[\phi_r(u,v)-\phi_n(u,v)+2vy_0] \quad (10)$$

由(10)式可见，在高频处，$|R(u,v)|$ 值很小。所以第二、三项的影响也很小。因此，这种振幅调制和功率谱相减的联合变换相关器无论输入景物噪声大与小均比基于条纹调节滤波的联合变换相关器和基于修正的条纹调节滤波的联合变换相关器能产生更好的相关输出性能。

3 计算机模拟结果

为了研究振幅调制和功率谱相减(AMPSS)的联合变换相关器的性能，本文考虑一输入景物含有如图2所示的多目标(汽车1，2)和非目标(汽车3)。单个参考图像(汽车0)，大小为31×15象素。模拟试验用二维快速傅里叶变换(FFT)程序，结果用三维绘图程序画出。这些图像合起来再填上零组成128×128像素的输入联合图像，为了将结果与其它类型的联合变换相关器相比较，分别对经典的联合变换相关器、基于条纹调节滤波的联合变换相关器、基于修正的条纹调节滤波的联合变换相关器和所提出的联合变换相关器进行试验。在所有的情况下，整个输出能量被归一化为值100，而相关峰强度用整个输出面的能量归一化。对条纹调节滤波，滤波函数 $H_{faf}(u,v)=\dfrac{B(u,v)}{A(u,v)+|R(u,v)|^2}$，其中 $A(u,v)$ 和 $B(u,v)$ 为常数或函数。$A(u,v)$ 取 1×10^{-6} 以克服极性问题。$B(u,v)$ 取为1。对修正的条纹调节滤波，滤波函数 $H_{mfaf}(u,v)=\dfrac{B(u,v)}{A(u,v)+|R(u,v)|}$，其中 $A(u,v)$ 取 1×10^{-3}，$B(u,v)$ 取为1。对振幅调制滤波，阈值TH取 1×10^{-4}。运算中分别计算相关峰强度、半宽度、峰噪比、识别力和直流项强度等。输入景物的信噪比(SNR)定义为目标的平均强度

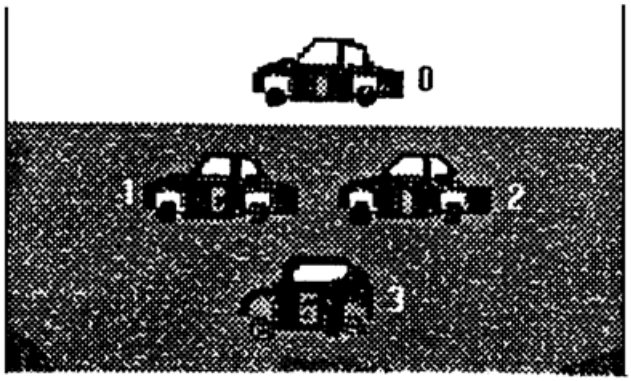

Fig. 2 Objects for the computer simulation tests

与背景噪声的平均强度之比。相关峰半宽度(FWHM)定义为相关峰值由最大降至一半时的总宽度。峰噪比(PNR)定义为相关峰强度与周围(目标大小)的噪声强度平均值之比。识别力(ACR)定义为自相关(0 号与 1、2 号汽车)峰强度与互相关(0 号与 3 号汽车)峰强度之比。

对输入景物的信噪比高和低两种情况分别进行试验。当输入景物的 SNR= 5, 试验结果列于表 1。由表 1 可见, 对输入景物噪声不大的情况, 基于条纹调节滤波的联合变换相关器的相关峰强度、识别力的峰噪比均大于基于修正的条纹调节滤波的联合变换相关器的值。这是因为条纹调节滤波乘上修正的联合功率谱, 增强了修正的联合功率谱的高频分量。所提出的振幅调制和功率谱相减的联合变换相关器的相关峰强度、识别力和峰噪比均为上述两种联合变换相关器的 3~ 4 倍。当输入景物的 SNR= 1.2, 试验结果列于表 2。由表 2 可见, 对输入景物浸没在严重噪声的情况, 基于修正的条纹调节滤波的联合变换相关器的相关峰强度和峰噪比均大于基于条纹调节滤波的联合变换相关器的值, 更重要的是基于条纹调节滤波的联合变换相关器不能识别图 2 所示的 1 号和 3 号汽车。振幅调制和功率谱相减的联合变换相关器的相关峰强度、识别力和峰噪比大约是基于修正的条纹调节滤波的联合变换相关器的两倍。这表明所提出的联合变换相关器比基于修正的条纹调节滤波有更大的适应噪声的能力。由表 1 和表 2 可见, 经典的联合变换相关器的相关输出性能都很差, 特别是相关峰宽度很大, 不适合作目标检测。

Table 1. Computer simulation results for SNR= 5

JTC	I_{AC}	FWHM	ACR	PNR	I_{DC}
classical	0.02	30×14	2.41	1.7	0.06
FAF	1.03	1×1	6.65	241	0.96
MFAF	1.00	1×1	4.59	65	1.8×10^{-4}
AMPSS	3.70	1×1	20.8	777	4.6×10^{-4}

Table 2. Computer simulation results for SNR= 1.2

JTC	I_{AC}	FWHM	ACR	PNR	I_{DC}
classical	0.01	> 60×30	2.0	1.2	2.5×10^{-2}
FAF	0.11	1×1	< 1	14	4.9×10^{-2}
MFAF	0.19	1×1	1.9	29	3.8×10^{-4}
AMPSS	0.35	1×1	3.4	82	5.5×10^{-4}

当输入景物的噪声不大(SNR= 5)时, 振幅调制和功率谱相减的联合变换相关器的相关输出三维图示于图 3(a)。为了比较, 基于条纹调节滤波的联合变换相关器和基于修正的条纹调节滤波的联合变换相关器的相关输出分别示于图 3(b)和图 3(c)。输入景物浸没在严重噪声(SNR= 1.2)时, 振幅调制和功率谱相减的联合变换相关器、基于条纹调节滤波的联合变换相关器和基于修正的条纹调节滤波的联合变换相关器的相关输出三维图分别示于图 4(a)、图 4(b)和图 4(c)。从图 3 和图 4 可见 振幅调制和功率谱相减的联合变换相关器的相关输出性能无论输入景物有无噪声均优于其它两种联合变换相关器。

计算机模拟试验还研究了振幅调制滤波阈值 TH 的选取对所提出的联合变换相关器输出性能的影响。试验分别对阈值 TH= 5×10^{-5}、10^{-4}和 10^{-3}三种情况下, 不同输入景物信噪比的相关峰强度、识别力和峰噪比进行计算。试验结果分别示于图 5、图 6 和图 7。为了比较,

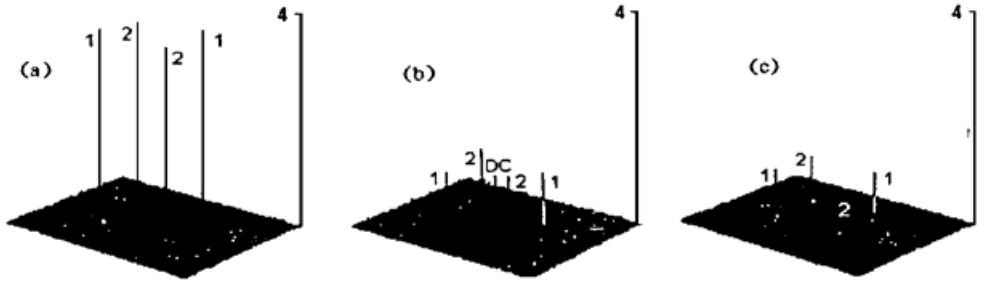

Fig. 3 Three-dimensional plots of the correlation output corresponding to Fig. 2 for SNR= 5 (a) from the proposed JTC, (b) from the FAF-based JTC, and (c) from the MFAF-based JTC

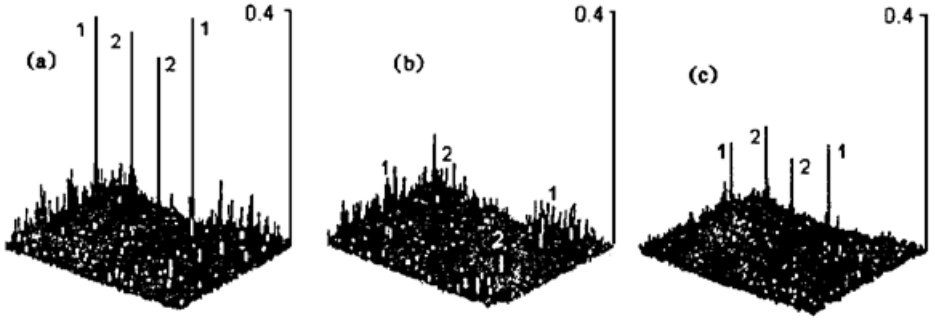

Fig. 4 Three-dimensional plots of the correlation output corresponding to Fig. 2 for SNR= 1.2 (a) from the proposed JTC, (b) from the FAF-based JTC, and (c) from the MFAF-based JTC

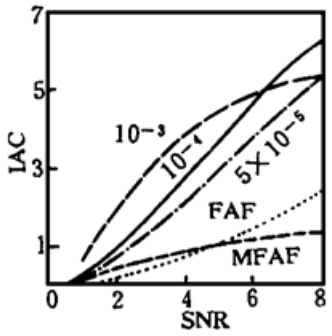

Fig. 5 Simulated correlation peak intensity of the three types of JTC as the function of signal-to-noise in the input scene

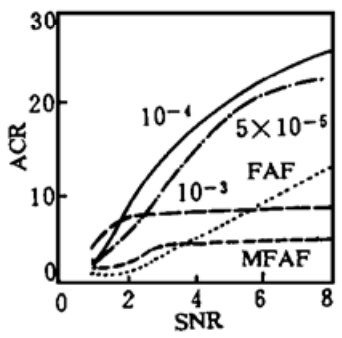

Fig. 6 Simulated discrimination ability of the three types of JTC as the function of signal-to-noise in the input scene

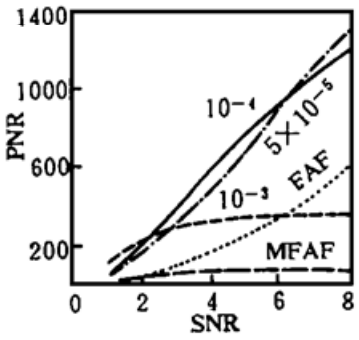

Fig. 7 Simulated peak-to-noise ratio of the three types of JTC as the function of signal-to-noise in the input scene

图中了示出基于条纹调节滤波的联合变换相关器和基于修正的条纹调节滤波的联合变换相关器的关系曲线。由图 5 可见, 不论输入景物信噪比如何, 振幅调制和功率谱相减的联合变换相关器的相关峰强度大于其它的联合变换相关器。当信噪比小于 6.5, 阈值取得较大时, 相关峰强度较大; 当信噪比大于 6.5, TH= 1×10^{-4}, 相关峰强度最大。当信噪比大于 4.7, 基于条纹调节滤波的联合变换相关器的相关峰强度大于基于修正的条纹调节滤波的值; 而当信噪比小于 4.7, 则前者小于后者。由图 6 可见, 当输入景物信噪比大于 1.9, TH= 1×10^{-4}的识别力最高; 而当信噪比小于 1.9, 则 TH= 1×10^{-3}的识别最高。但它们都比其它两种联合变换相关器的识别力高。由图 6 还可见, 当信噪比大于 3.7, 基于条纹调节滤波的联合变换相关器的识别力比基于修正的条纹调节滤波的联合变换相关器的值高; 而当信噪比小于 3.7, 则相反。由图 7 可见, 当输入景物信噪比 2.2< SNR< 6.5, TH= 1×10^{-4}的峰噪比最大; 而当信噪比小于 2.2, 则 TH= 1×10^{-3}的峰噪比最大。但它们在信噪比小于 6 的峰噪比都比其

它两种联合变换相关器的值大。综上所述，振幅调制滤波的阈值 TH 取 1×10^{-4}能适应输入景物的各种噪声情况。

结　论　本文已证实了一种使用振幅调制和功率谱相减的联合变换相关器作多目标检测的方法。在这种方法中，联合功率谱在乘上振幅调制的滤波函数之前，先用纯输入景物的功率谱和参考图像的功率谱减去联合功率谱。这种方法对多目标的输入景物能产生更好的相关输出性能，不受输入景物是噪声小或有严重噪声破坏的影响。它也可避免因输入景物中存在多个目标而产生虚假的相关峰。所提出的振幅调制和功率谱相减的联合变换相关器比基于条纹调节滤波的联合变换相关器和基于修正的条纹调节滤波的联合变换相关器能产生更好的相关峰强度、识别力和峰噪比。

参　考　文　献

[1] C. S. Weaver, J. W. Goodman, A technique for optically convolving two functions. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(7): 1248~1249

[2] B. Javidi, C. J. Kuo, Joint transform image correlation using a binary spatial light modulator at the Fourier plane. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(4): 663~665

[3] D. Feng, H. Zhao, S. Xia, Amplitude-modulated JTC for improving correlation discrimination. *Opt. Commun.*, 1991, **86**(3/4): 260~264

[4] M. S. Alam, M. A. Karim, Fringe-adjusted joint transform correlation. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(23): 4344~4350

[5] M. S. Alam, M. A. Karim, Multiple target detection using a modified fringe adjusted joint transform correlator. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(5): 522~527

[6] R. K. Wang, L. Shang, C. R. Chatwin, Modified fringe-adjusted joint transform correlation to accommodate noise in the input scene. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(2): 286~296

Multiple Target Detection Using an Amplitude Modulated and Power Spectrum Subtracted Joint Transform Correlator

Lai Hongkai　　Huang Xianlie　　Gao Zehua

(*Department of Physics, Xiamen University, Xiamen* 361005)

(Received 18 January 1997; revised 14 March 1997)

Abstract　Multiple target detection using an amplitude modulated and power spectrum subtracted joint transform correlator is proposed. In this technique, the joint power spectrum is firstly modified by the subtraction of the power spectra of the input-scene-only and of the reference image from it, the resultant modified joint power spectrum is next multiplied by the amplitude modulated filter function. The effect of noise in the input scene on the performance of the joint transform correlator is analyzed and quantified. The technique is found to deliver a better correlation output and the capacity to accommodate noise in the input scene than both the fringe adjusted filter-and the modified fringe adjusted filter-based joint transform correlators.

Key words　optical pattern recognition, joint transform correlator, multiple target detection, power spectrum.