

文章编号: 0258-702X(2002)04-0351-05

# 基于归一化的条纹调制联合变换相关器

李源, 刘艺, 王仕藩

(电子科技大学应用物理系, 四川成都 610054)

**摘要** 提出基于归一化的条纹调制联合变换相关识别方法(FAF NJTC), 分析证明了这一方法的可行性。数值模拟结果表明, 新方法的相关输出结果与 NJTC 相比相关峰更加明显、锐利, 与 FAF JTC 相比则大大地提高了其抗干扰的能力, 且不同光照下的相关输出稳定; 0~0.2 噪声级的计算表明, 新方法较大地提高了相关结果的平均强度之比(PBR)和分辨率。

**关键词** 联合变换相关, 归一化, 条纹调制, 联合功率谱

中图分类号 O 438 文献标识码 A

## Normalized Fringe-adjusted Joint Transform Correlator

LI Yuan, LIU Yi, WANG Shi-fan

(Department of Applied Physics, University of Electronic  
Science & Technology of China, Chengdu 610054)

**Abstract** In this paper, a new method for target recognition, normalized fringe-adjusted joint transform correlation is proposed. Analysis shows that the method can work more effectively. Simulation results show that, compared with NJTC and JTC, the correlation peak is more obvious, sharper; compared with FAF JTC, the anti-noise ability is greatly increased; and simulation shows that in 0 to 0.2 noise level, the new method increases PBR, and discrimination; the output is stable under different illumination.

**Key words** joint transform correlation, normalization, fringe-adjusted, joint power spectrum

## 1 引言

用在光学图像识别的相关器主要分为匹配滤波相关器(Vander Lugt 相关器)和联合变换相关器(JTC)两大类。由于联合变换相关器无需制作要求精确复位的复空间匹配滤波器,因而更适用于对图像进行实时识别。近来, Alam 等提出了条纹调制的联合变换相关器(FAF JTC)<sup>[1]</sup>, 它用条纹调节滤波函数对联合变换功率谱进行调制, 这种相关器的相关峰比较锐利, 但对噪声较敏感; Zhang 等提出了一种归一化联合变换相关器(NJTC)<sup>[2]</sup>, 可对目标与参考物的匹配进行判决, 但这种相关器输出峰不够尖锐, 存在宽的相关宽度。

本文提出了一种新的联合变换相关方法(FAF NJTC), 其核心是对 NJTC 的联合变换功率谱用条纹

调制滤波器进行调制。模拟结果表明提出的 FAF NJTC 的相关输出峰更锐利, 提高了辨别率; 对不同噪声和光照条件下的性能稳定。

## 2 基于归一化的条纹调制联合变换相关器分析

FAF NJTC 的基本结构如图 1 所示, 在 SLM 处加入了一个条纹调制滤波器; 其输入平面同时输入 4 幅图像, 如图 2 所示。图中待识别目标  $t(x, y)$  和它的平方  $t^2(x, y)$  放在输入平面的上半部分, 参考物为  $r(x, y)$ , 为了进行归一化操作, 设置一参考物的支持  $s(x, y)$

$$s(x, y) = \begin{cases} 1 & (x, y) \in \text{support of } r(x, y) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期 2000-12-18; 收到修改稿日期 2001-02-26

作者简介: 李源(1976—), 女, 硕士, 现在绵阳中国工程物理研究院工作, 主要从事光电信息研究。

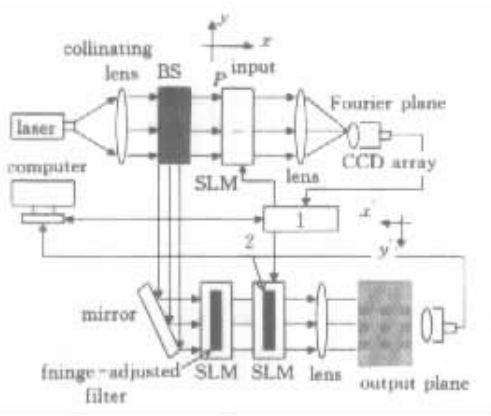


图1 联合变换相关器实现原理图

1 转换电路 2 联合功率谱

Fig.1 Realizing principle scheme of JTC

1: transformation circuit; 2: combination power spectrum

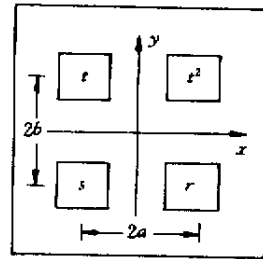


图2 输入平面示意图

Fig.2 Demonstration of input plane

相应的联合输入图像可表达为

$$f(x, y) = t(x + a, y - b) + t^2(x - a, y - b) + s(x + a, y + b) + r(x - a, y + b) \quad (2)$$

$2a$  和  $2b$  分别为图像中心之间的水平和垂直距离。

联合图像由傅里叶透镜进行傅氏变换后,由 CCD 探测产生的联合功率谱  $|F|^2$  为

$$\begin{aligned} |F|^2 = & |T|^2 + TT_1^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(2ua)\right] + TS^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(-2bv)\right] + TR^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(2ua - 2bv)\right] + \\ & T_1 T^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(-2ua)\right] + |T_1|^2 + T_1 S^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(-2ua - 2bv)\right] + \\ & T_1 R^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(-2bv)\right] + \\ & ST^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(2bv)\right] + ST_1^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(2ua + 2bv)\right] + |S|^2 + SR^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(2ua)\right] + \\ & RT^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(-2ua + 2bv)\right] + RT_1^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(2bv)\right] + RS^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(-2ua)\right] + |R|^2 \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $T_1$  为  $t_1 = t^2$  的傅氏变换。

NJTC 是对上式直接进行反变换,然后探测  $t \otimes r$  和  $t^2 \otimes s$ ,并相比得到归一化的相关输出<sup>[2]</sup>。本文在做逆变换之前,先对联合功率谱减去  $|T|^2, |S|^2,$

$|R|^2, |S|^2$  和  $|R|^2$  可以预先存贮在计算机内,  $|T|^2$  可以通过仅在 JTC 输入平面放置目标图像而得到。因此

$$\begin{aligned} |F_2|^2 = & |F|^2 - |T|^2 - |S|^2 - |R|^2 = \\ & TT_1^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(2ua)\right] + TS^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(-2bv)\right] + TR^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(2ua - 2bv)\right] + \\ & T_1 T^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(-2ua)\right] + |T_1|^2 + T_1 S^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(-2ua - 2bv)\right] + \\ & T_1 R^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(-2bv)\right] + \\ & ST^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(2bv)\right] + ST_1^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(2ua + 2bv)\right] + SR^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(2ua)\right] + \\ & RT^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(-2ua + 2bv)\right] + RT_1^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(2bv)\right] + RS^* \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(-2ua)\right] \end{aligned} \quad (4)$$

将联合变换功率谱  $|F_2|^2$  再经条纹调制滤波器 (Fringe-Adjusted Filter, FAF) 调制,FAF 的滤波函数可表示为

$$H_{\text{FAF}} = \frac{B(u, v)}{A(u, v) + |R|^2} \quad (5)$$

其中  $A(u, v), B(u, v)$  为常数或函数;一般来说  $B$

取  $1/A$  在  $1$  与  $10^{-6}$  之间取值。当  $B(u, v) = 1$  且  $|R|^2 \gg A(u, v)$  时 (5) 式可简化为

$$H_{\text{FAF}} \approx 1/|R|^2 \tag{6}$$

故  $|F_2|^2$  经条纹调制滤波器调制后为

$$\begin{aligned} |F_2|_{\text{FAF}}^2 &= |F_2|^2 \times H_{\text{FAF}} \approx |F_2|^2 \times \frac{1}{|R|^2} = \\ &\frac{TT^*}{|R|^2} \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(2ua)\right] + \frac{TS^*}{|R|^2} \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(-2bv)\right] + \frac{TR^*}{|R|^2} \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(2ua - 2bv)\right] + \\ &\frac{T_1T^*}{|R|^2} \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(-2ua)\right] + \frac{|T_1|^2}{|R|^2} + \frac{T_1S^*}{|R|^2} \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(-2ua - 2bv)\right] + \frac{T_1R^*}{|R|^2} \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(-2bv)\right] + \\ &\frac{ST^*}{|R|^2} \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(2bv)\right] + \frac{ST_1^*}{|R|^2} \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(2ua + 2bv)\right] + \frac{SR^*}{|R|^2} \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(2ua)\right] + \\ &\frac{RT^*}{|R|^2} \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(-2ua + 2bv)\right] + \frac{RT_1^*}{|R|^2} \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(2bv)\right] + \frac{RS^*}{|R|^2} \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda f}(-2ua)\right] \end{aligned} \tag{7}$$

本文感兴趣的是 (7) 式的第 3, 6, 9, 11 项, 其中第 3 项和第 11 项的傅里叶逆变换是一对共轭互相关项, 第 6 项和第 9 项也是如此, 因此仅对第 3 和第 6 项进行分析, 由于  $\exp(\cdot)$  函数对逆变换的作用仅是把坐标  $x, y$

平移, 因此暂不考虑其变换影响。

根据式 (1) 有  $s(x, y)(x, y) = r(x, y)$ , 故光学线性相关的输出可写为

$$c(x', y') = \left| \iint r(x + x', y + y')s(x, y)(x, y) dx dy \right|^2 \tag{8}$$

对式 (8) 应用克西-许瓦兹不等式, 得

$$c(x', y') \leq \iint |r(x + x', y + y')s(x, y)|^2 dx dy \iint |r(x, y)|^2 dx dy \tag{9}$$

故归一化相关为

$$N(x', y') = \frac{\left| \iint r(x + x', y + y')s(x, y) dx dy \right|^2}{\iint |r(x + x', y + y')s(x, y)|^2 dx dy \iint |r(x, y)|^2 dx dy} \leq 1 \tag{10}$$

且仅当  $r(x, y) = r(x, y) \cdot s(x, y)$  时 (10) 式等号成立。

由式 (1) 有  $s^2(x, y) = s(x, y)$ , 当  $t, r, s$  是非负数时 (10) 式可写成

$$N(x', y') = \frac{1}{c} \cdot \frac{[r(x', y') \otimes r(x', y')]}{t^2(x', y') \otimes s(x', y')} \tag{11}$$

式中  $c = \iint r^2(x, y) dx dy$ 。

现对经 FAF 调制后的  $|F_2|_{\text{FAF}}^2$  进行归一化, 令

$$TR^*/|R|^2 = \Phi_1, T_1S^*/|R|^2 = \Phi_2 \tag{12}$$

记相关符号为  $\otimes$ , 卷积符号为  $*$ , 令条纹调制滤波函数  $H_{\text{FAF}}$  的逆傅里叶变换为  $h_{\text{FAF}}$ , 有

$$h_{\text{FAF}} = F^{-1}\{H_{\text{FAF}}\} = F^{-1}\{1/|R|^2\}$$

对式 (12) 进行逆傅里叶变换得

$$\begin{cases} \phi_1 = F^{-1}\{TR^*/|R|^2\} = F^{-1}\{TR^*\} * F^{-1}\{1/|R|^2\} = t \otimes r * h_{\text{FAF}} \\ \phi_2 = F^{-1}\{T_1S^*/|R|^2\} = F^{-1}\{T_1S^*\} * F^{-1}\{1/|R|^2\} = t^2 \otimes s * h_{\text{FAF}} \end{cases} \tag{13}$$

对比如 (3) 式的联合变换功率谱归一化, 有

$$TR^* = \Phi_1', T_1S^* = \Phi_2'$$

$$N = \frac{1}{c} \frac{[t \otimes r]}{t^2 \otimes s} = \frac{1}{c} \frac{\phi_1'^2}{\phi_2'} \tag{14}$$

其逆傅里叶变换为

$$t \otimes r = \phi_1', t^2 \otimes s = \phi_2'$$

故可得此时新的相关器的输出  $N_{\text{FAF}}$  为

$$N_{\text{FAF}} = \frac{1}{k_c} \cdot \frac{\phi_1'^2}{\phi_2'} = \frac{1}{k_c} \cdot \frac{[(t \otimes r) * h_{\text{FAF}}]}{[(t^2 \otimes s) * h_{\text{FAF}}]} \tag{15}$$

根据式 (11) 归一化相关器此时的输出为

为使  $N_{\text{FAF}}$  输出为 1, 计算时使用  $k_c$  进行调节。 $k_c$  的意

义是经条纹调制后的自相关峰,参考图像与一定的  $k_c$  对应,参考图像不同  $k_c$  也不相同。

由式(15)可见,系统变换的结果是用条纹调制函数对  $t \otimes r$  和  $t^2 \otimes s$  进行调制,由于条纹调制函数的作用,调制后的输出比 NJTC 的输出效果要尖锐得多,因此对相关结果的判别也比较容易。

### 3 模拟结果及讨论

为验证所提出的 FAF NJTC 的有效性,本文用二维快速傅里叶变换方法进行了计算机模拟。模拟采用二值图像,输入目标包含两个字母 E 和 F,其输入联合图像如图 3 所示;图 3 中包含输入目标  $t$  ( $128 \times 128$  像素),输入目标的平方  $t^2$  ( $128 \times 128$  像素),参考物  $r$  ( $64 \times 64$  像素),以及参考物的支持函数  $s$  ( $64 \times 64$  像素),这 4 幅图像组合起来并被零填充形成联合输

入图像。

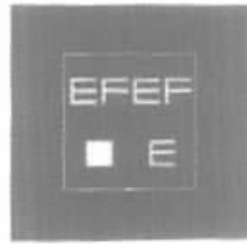


图 3 模拟输入的联合输入图像

Fig.3 Joint input scene of simulation input

FAF NJTC 的输出结果如图 4(a)所示,图 4(b)和图 4(c)分别给出的是 FAF JTC 和 NJTC 对应的输出结果。从这 3 幅图可以看出,FAF NJTC 中二相关峰的高度差明显,其分辨能力比 FAF JTC 高;同时它的输出峰比 NJTC 的尖锐得多。

考察 FAF NJTC 对输入图像中含有噪声的情况,

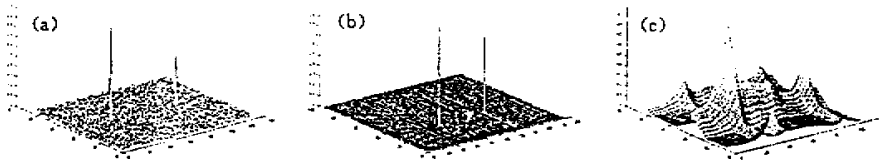


图 4 相同光照情况下三种联合变换相关器的输出结果比较

(a) FAF NJTC 输出结果 (b) FAF JTC 输出结果 (c) NJTC 输出结果

Fig.4 Comparison of correlation output among three JTCs under same illumination

(a) output of FAF NJTC ;(b) output of FAF JTC ;(c) output of NJTC



图 5 0.2 个噪声级下 3 种联合变换相关器的输出结果比较

(a) FAF NJTC 输出结果 (b) FAF JTC 输出结果 (c) NJTC 输出结果

Fig.5 Comparison of correlation output among three JTCs under 0.2 noise level

(a) output of FAF NJTC ;(b) output of FAF JTC ;(c) output of normalized JTC

输入目标仍如图 3,但在输入中加入了 0.2 个噪声级(噪声的均方差)的噪声,噪声采用均匀分布的随机噪声。FAF NJTC,FAF JTC,NJTC 在这种情况下的输出分别对应图 5(a)~(c)。由图 5 可见,FAF JTC 的抗噪性较差,而 FAF NJTC 在目标含有较高噪声时仍有较好的输出。

为了更好地衡量 FAF NJTC 输出峰的尖锐性,在 0~0.2 噪声级情况下,计算了以上 3 种 JTC 的相关输

出平面上相关峰强度与可见域内除去相关峰之外的相关信号的平均强度之比(PBR),结果如图 6(a)~(c)所示。由图 6 可见,随着噪声的增大,FAF NJTC 的 PBR 的值在  $0.8 \sim 0.6 \times 10^{-2}$  之间,而 FAF JTC 的 PBR 在  $10^{-2} \sim 10^{-4}$  之间,NJTC 的 PBR 在  $0.3 \times 10^{-2}$  左右。FAF NJTC 的 PBR 相当稳定,比 NJTC 的 PBR 高一倍,与 FAF JTC 相比,其输出峰的尖锐性和抗噪性能更优越。

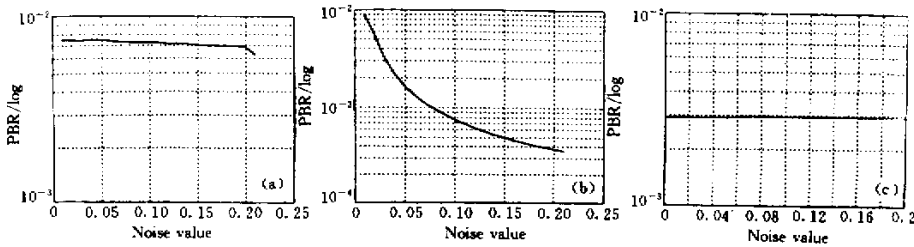


图 6 0~0.2 个噪声级下 3 种联合变换相关器 PBR 的输出比较

(a) FAF NJTC 输出结果 (b) FAF JTC 输出结果 (c) NJTC 输出结果

Fig.6 Comparison of PBR among three JTCs under 0~0.2 noise level

(a) output of FAF NJTC ;(b) output of FAF JTC ;(c) output of Normalized JTC

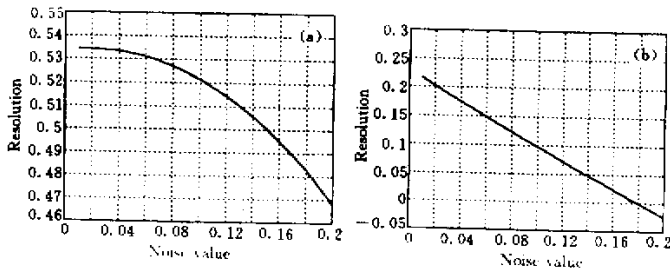


图 7 0~0.2 个噪声级下 FAF NJTC 和 FAF JTC 分辨率的比较

(a) FAF NJTC 的输出结果 (b) FAF JTC 的输出结果

Fig.7 Comparison of discriminability between the new JTC and FAF JTC under 0~0.2 noise level

(a) output of FAF NJTC ;(b) output of FAF JTC

定义分辨率为 :分辨率 = ( 自相关峰 - 互相关峰 ) / 互相关峰 , 在 0~0.2 个噪声级的情况下研究 FAF NJTC 的分辨能力 , 如图 7 (a) (b) , 可见 FAF NJTC

的分辨率明显比 FAF JTC 的分辨率高 , 在 0~0.2 个噪声级的情况下 , FAF NJTC 的分辨率一直大于零 , 而 FAF JTC 的分辨率则出现了小于零的情况 , 这说明 FAF JTC 有时候会出现误判 , 不能正确鉴别出目标 , 而本文提出的 FAF NJTC 则不存在这个问题。

图 8 是当光照发生变化时 , FAF NJTC 的输出情况。输入的两个目标都是 F , 参考物也是 F 。对输入的两个目标施以不同的光照 , 其中一个目标的光照为另一个的 0.8 。 FAF NJTC 与 FAF JTC 的输出分别对应图 8 (a) (b) 和图 8 (c) (d) 。从图 8 (a) (b) 可以看出 FAF NJTC 并不受光照的影响 , 这一点和 NJTC 相似。而 FAF JTC 则受光照变化的影响 , 即使是相同的目标 , 光照不同时输出的两个峰的高度也不相同 , 如图 8 (c) (d) 所示。本文所提出的 FAF NJTC 则没有这种情况。

参 考 文 献

- 1 Mohammad S. Alam , Mohammad A. Karim. Fringe-adjusted joint transform correlation [ J ]. *Appl. Opt.* , 1993 , **32** ( 23 ) : 4344 ~ 4350
- 2 Shuqun Zhang , Mohammad A. Karim. Normalized joint transform correlation for target recognition [ J ]. *Opt. Eng.* , 2000 , **39** ( 5 ) : 1184 ~ 1189

图 8 目标光照分别为 1 和 0.8 下的 FAF NJTC 和 FAF JTC 的输出结果比较

(a) FAF NJTC 三维输出结果 (b) FAF NJTC 二维输出结果 ; (c) FAF JTC 三维输出结果 (d) FAF JTC 二维输出结果

Fig.8 Comparison of output between the FAF NJTC and FAF JTC under the illumination of 1 and 0.8

(a) 3-D output of FAF NJTC ;(b) 2-D output of FAF NJTC ; (c) 3-D output of FAF JTC ;(d) 2-D output of FAF JTC