

文章编号 1004-924X(2008)11-2110-04

利用空间光调制器的衍射特性提高 VLC 输出相关峰值

沈学举¹,姚广涛²,胡文刚¹,杜柏钢¹

(1. 军械工程学院,河北石家庄 050003;2. 73653 部队,福建泉州 362341)

摘要: Vander Luget 相关器(VLC)中,由于空间光调制器(SLM)像素的周期性结构,在匹配滤波面上会产生目标图像的多级衍射谱。为了提高 VLC 输出的相关峰值,在不同级衍射谱处同时加载了匹配滤波器进行匹配滤波。理论分析表明,各级谱输出的相关点在输出面上位置相同,相干叠加的结果会使输出相关峰值提高。实验结果表明,和只对 0 级谱进行匹配滤波的情况相比,对目标图像的多级衍射谱同时进行匹配滤波可使平均输出相关峰值提高约 32%,该方法能有效提高 VLC 的输出相关峰值。

关键词: 光学相关识别; Vander Luget 相关器; 空间光调制器; 相关峰; 干涉; 衍射

中图分类号: O438.2; TP391 **文献标识码:** A

Enhancing correlation peak value in VLC by diffraction characteristic of SLM

SHEN Xue-ju¹, YAO Guang-tao², HU Wen-gang¹, DU Bai-gang¹

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. 73654 Corps., Quanzhou 362341, China)

Abstract: The multilevel diffraction spectrum of target image on the filtering plane produced by the periodic structure of Space Light Modulator(SLM) in Vander Luget Correlator(VLC) was obtained. In order to increase output correlation peak value, matched filters can be loaded at the positions of different diffraction spectra on the filtering SLM at the same time to perform matched filtering of multilevel diffraction spectra. Theoretical analysis results indicate the correlation spots from different diffraction spectrum outputs are at the same position of the output plane, and the correlation peak value is improved with coherent superposition of multilevel correlation spots. The experimental results show that the mean output correlation peak value by performing matched filtering for multilevel diffraction spectra of target image has increased about 32% than that of zerolevel spectrum. The output correlation peak value can be effectively increased using this method.

Key words: optical correlation recognition; Vander Luget Correlator(VLC); Space Light Modulator(SLM); correlation peak; interference; diffraction

1 引言

Vander Luget 相关器(VLC)用于光学相关

识别时,要求输出相关峰值越高越好。为提高相关峰值,许多文献应用匹配滤波器算法^[1-7]和编码方法^[8-9]对其进行了研究。由于 VLC 中场景空间光调制器(SLM)像素的周期性结构,在 VLC

收稿日期:2008-04-16;修订日期:2008-06-26.

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(No. F200700815)

匹配滤波平面上将得到目标图像的多级傅里叶谱。若在滤波 SLM 上加载相应的匹配滤波器同时对多级傅里叶谱分别匹配滤波,由于各级傅里叶谱输出的相关点位置重合,相干叠加的结果将明显提高输出相关峰值。

2 理论分析

VLC 原理图如图 1 所示。设输入场景中 (x_0, y_0) 处目标图像为 $f(x - x_0, y - y_0)$, 由于 SLM₁ 像素的周期性分布,经透镜 1 光学傅里叶变换在滤波面上将得到目标图像的多级傅里叶谱。振幅为 1 的单色平面波照射下,滤波面上光场复振幅分布为^[10]:

$$G(x', y') = \exp\{-i2\pi(ux_0 + vy_0)\} \cdot \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \beta(m, n) F(u - \frac{m}{d_x}, v - \frac{n}{d_y}), \quad (1)$$

式中, $\beta(m, n) = \frac{b_x b_y}{d_x d_y} \sin c(\frac{mb_x}{d_x}) \sin c(\frac{nb_y}{d_y})$, b_x, b_y, d_x, d_y 分别为 SLM₁ 像素尺寸和间隔; m, n 分别是滤波面上 x', y' 方向的衍射级数; $F(u, v)$ 为

$$G'(x', y') = \exp\{-i2\pi(ux_0 + vy_0)\} \cdot \left[\sum_{m=-1}^{+1} \sum_{n=-1}^{+1} \beta(m, n) F(u - \frac{m}{d_x}, v - \frac{n}{d_y}) F^*(u - \frac{m}{d_x}, v - \frac{n}{d_y}) \right] = \exp\{-i2\pi(ux_0 + vy_0)\} \cdot \left[\sum_{m=-1}^{+1} \sum_{n=-1}^{+1} \beta(m, n) \left| F(u - \frac{m}{d_x}, v - \frac{n}{d_y}) \right|^2 \right]. \quad (3)$$

从式(3)可以看出对各级衍射谱匹配滤波后得到 5 束传播方向相同的非均匀平面波,通过透镜 2 后在其后焦面上汇聚于同一点,即各级衍射谱输出相关点位置相同。

$$G''(x'', y'') = \mathfrak{F}^{-1}\{G'(x', y')\} = \sum_{m=-1}^{+1} \sum_{n=-1}^{+1} \beta(m, n) f(x'', y'') \otimes f(x'', y'') e^{i2\pi(\frac{m}{d_x}x'' + \frac{n}{d_y}y'')} \ast \delta(x'' + x_0, y'' + y_0) = \frac{b_x b_y}{d_x d_y} [1 + 2\sin c(\frac{b_x}{d_x}) \cos(2\pi \cdot \frac{x'' + x_0}{d_x}) + 2\sin c(\frac{b_y}{d_y}) \cos(2\pi \frac{y'' + y_0}{d_y})] f(x'' + x_0, y'' + y_0) \otimes f(x'' + x_0, y'' + y_0), \quad (4)$$

式中, \ast 表示卷积, \otimes 表示相关。输出面上相对光强分布为:

$$I(x'', y'') = |G''(x'', y'')|^2. \quad (5)$$

即输出面上的场分布是 5 级衍射谱各自输出场分布的相干叠加,且各级谱输出相关点的位置

目标图像 $f(x, y)$ 的傅里叶变换;空间频率 $u = \frac{x'}{\lambda f}, v = \frac{y'}{\lambda f}$; x, y 为输入面空间坐标; x', y' 为滤波面空间坐标; f 是透镜焦距。

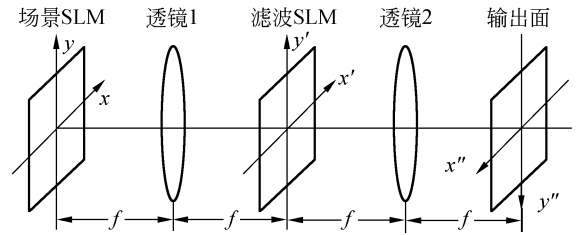


图 1 VLC 原理示意图
Fig. 1 Principle of VLC

考虑滤波面上 0 级和 x', y' 方向的 ± 1 级衍射谱,在 SLM₂ 上加载 5 幅匹配滤波器分别对目标图像的 0, ± 1 级衍射谱匹配滤波。在 (m, n) 级谱处所加匹配滤波器的滤波函数为:

$$H_{mm}(u, v) = F^*(u - \frac{m}{d_x}, v - \frac{n}{d_y}). \quad (2)$$

各级衍射谱通过相应的匹配滤波器匹配滤波后的复振幅分布为:

在输出平面上取反向坐标系,则各级衍射谱经匹配滤波后再经透镜 2 光学傅里叶逆变换,在输出面上得到的光场复振幅分布为:

重合,因此可提高输出相关峰值。

3 实验结果及分析

为验证上述理论分析,利用实验平台上搭建

的相关器进行了实验,实验装置如图 2 所示。所用 SLM 为 XGA1 型,像素间距为 $36 \mu\text{m}$,傅里叶透镜焦距为 400 mm ,He-Ne 激光器作光源,波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ 。目标图像如图 3 所示为一预警机图像,整幅图像像素数为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。

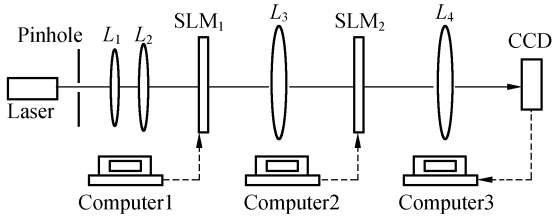


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Scheme of experiment setup

用 Photoshop 软件间隔 6° 旋转目标图像得到 10 幅图像构成训练样本集,对应目标图像的畸变范围是 $0 \sim 54^\circ$,文献[4]所述的非约束纯相位匹配滤波函数为:

$$h = e^{-\phi}, \quad (6)$$

式中,第 i 幅训练样本图像为 $f_i(x, y)$, N 幅训练样本图像傅里叶谱复振幅分布平均值是 $\bar{F}(u, v)$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i(u, v), \phi \text{ 是 } \bar{F} \text{ 的相因子。}$$

利用式(6)和迂回相位编码^[9]方法制作匹配滤波器,则设计的匹配滤波器能识别 $0 \sim 54^\circ$ 畸变范围的目标图像。光学相关识别中所用输入场景图像是间隔 3° 旋转目标图像得到的 19 幅图象。

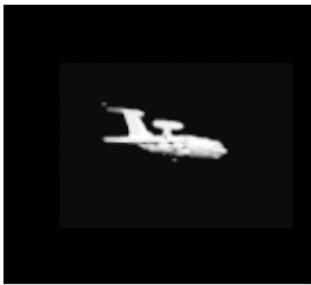


图 3 待识别图像

Fig. 3 Image to be recognized

按图 2 所示的实验装置,由 Computer1 将场景图像加载于 SLM₁,由 Computer2 将制作的匹配滤波器加载于 SLM₂,由编制的软件控制匹配滤波器以一个像素间距为步长上下左右移动,可使匹配滤波器和目标图像的傅里叶谱准确对准。

同时加载 5 幅匹配滤波器,并分别和 SLM₁ 产生的场景图像的 $0, \pm 1$ 级衍射谱准确对准,输出相关点由 CCD 接收,经采集卡显示在 Computer3 上并存储。实验得到的输出相关峰灰度值随目标图像旋转角度变化曲线如图 4 所示。

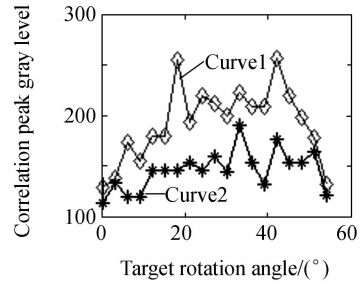


图 4 相关峰灰度随目标旋转角度变化的实验曲线
Fig. 4 Correlation peak grey levels vs target rotation angles

图 4 中 Curve1 对应多级衍射谱匹配滤波, Curve2 对应仅对 0 级谱匹配滤波,曲线是将最大相关峰值归 255 灰度值画出的。实验相关点示例如图 5 所示。由于光学相关识别过程中对场景 SLM 产生的多级衍射谱同时进行匹配滤波,且各级谱在输出平面上输出的相关点重合,相干叠加的结果明显提高了输出相关峰值。由图 5 可看到输出面上存在较清晰的干涉条纹,为看清干涉条纹,图 5 中仅截取了相关点附近的部分图像。

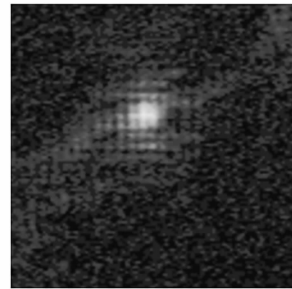


图 5 实验相关点

Fig. 5 Experimental correlation spot

由于实验过程中很难保证 SLM₂ 和滤波平面严格重合,且 SLM₂ 在垂直于光轴的平面内有小角度倾斜,处在 SLM₂ 上不同位置的匹配滤波器和相应的傅里叶谱对准精度很难保证严格一致,实验中挡住其它光束只让 x, y 方向 4 个 ± 1 级谱中的一束光透过,可明显看到 x, y 方向 4 个

±1 级谱各自输出的相关峰灰度值并不相同。另外还存在激光功率的波动以及震动等影响,使实验结果和理想的理论分析结果有较大差异。图 4 中曲线 Curve2 对应的灰度平均值为 145.2,曲线 Curve1 对应的灰度平均值为 192.3,即平均相关峰值提高了约 32%。实验结果表明,通过对目标图像的多级衍射谱同时进行匹配滤波,可以明显提高输出相关峰值。

4 结 论

由于 VLC 中所用 SLM 像素的周期性结构,

经光学傅里叶变换在匹配滤波面上将产生目标图像的多级衍射谱。通过在滤波平面上不同级衍射谱处同时加载匹配滤波器分别对多级衍射谱进行匹配滤波,理论分析表明,由于各级衍射谱各自输出相关点在输出面上位置相同,相干叠加的结果使输出相关峰值提高。实验结果证明,对 0、±1 级衍射谱同时匹配滤波时比仅对 0 级谱匹配滤波时输出的相关峰值增加约 32%,即在滤波平面上同时对不同级衍射谱匹配滤波可有效提高输出相关峰值。

参考文献:

- [1] 王玉荣,徐鹏,王青圃,等. 光电混合联合变换器中各元器件结构参数之间的关系[J]. 光学精密工程,2005,13(3):376-384.
WANG Y R, XU P, WANG Q P, *et al.*. Relation between parameters in hybrid/electronic joint transform correlator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(3):376-384. (in Chinese)
- [2] 沈学举,王永仲,姚广涛,等. 扩展等相关峰综合鉴别函数算法研究[J]. 光学精密工程,2008,16(1):156-160.
SHEN X J, WANG Y ZH, YAO G T, *et al.*. Study on extended equal correlation peak synthetic discriminant function algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1):156-160. (in Chinese)
- [3] VIJAYA KUMAR B V K. Tutorial survey of composite filter designs for optical correlators[J]. *Appl. Opt.*, 1992,31(23):4773-4801.
- [4] VIJAYA KUMAR B V K, HASSEBROOK L. Performance measures for correlation filters[J]. *Appl. Opt.*, 1990, 29(20):2997-3006.
- [5] MAHALANOBIS A, VIJAYA KUMAR B V K. Unconstrained correlation filters[J]. *Appl. Opt.*, 1994,3(17): 3751-3759.
- [6] 沈学举,王永仲,姚广涛. 非约束纯相位空间匹配滤波器设计研究[J]. 光子学报,2007,36(5):945-949.
SHEN X J, WANG Y ZH, YAO G T. Research on unconstrained phase-only matched filtering design[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007,36(5):945-949. (in Chinese)
- [7] 王肇圻,邵昕欣,母国光,等. 计算全息术制备特种空间滤波器[J]. 中国激光,1998,29:804-808.
WANG ZH Q, SHAO X X, MU G G, *et al.*. Spatial filters using computer generated hologram[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998,29:804-808. (in Chinese)
- [8] JUDAY R D. Optimal realizable filters and the minimum Euclidean distance principle[J]. *Appl. Opt.*, 1993,32(26): 5100-5111.
- [9] 虞祖良,全国藩. 计算机全息图[M]. 北京:清华大学出版社,1984:48-50.
YU Z L, JIN G F. *Computer-generated Hologram*[M]. Beijing:Qinghua University Press,1984:48-50. (in Chinese)
- [10] 陈前荣,周金鹏. 光学信息处理中 TFT-LCD 像素结构衍射的干扰[J]. 应用激光,2003,23(1):37-40.
CHEN Q R, ZHOU J P. Disturbance of the diffraction of TFT-LCD pixels structure on optical information processing[J]. *Applied Laser*, 2003,23(1):37-40. (in Chinese)

作者简介:沈学举(1963—),山东人,博士,副教授,主要从事激光技术和光学相关识别方面的教学和研究工作。E-mail: shxjoptics@yahoo.com.cn