

# 基于功率谱压缩-平移的多通道联合变换 相关识别方法研究

林超<sup>1\*</sup>, 娄树理<sup>2</sup>, 化斌斌<sup>3</sup>, 刘佩<sup>1</sup>, 张文龙<sup>1</sup>

<sup>1</sup>海军航空大学航空作战勤务学院, 山东 烟台 264000;

<sup>2</sup>烟台大学光电信息科学与工程学院, 山东 烟台 264000;

<sup>3</sup>中国人民解放军 32200 部队, 辽宁 锦州 121000

**摘要** 为了充分利用光学相关识别系统的空间-频谱带宽, 提高光学相关识别技术的并行处理效率和识别准确度, 提出了基于功率谱压缩-平移算法的多通道联合变换相关识别方法, 该方法将峰值位置变化的标准差作为相关识别的判据。在输入空间光调制器的不同区域加载场景图像和  $N$  幅参考图像, 然后在图像上分别叠加经迭代算法优化的相位模板, 使得场景图像的傅里叶谱和每一幅参考图像的傅里叶谱在频谱面的不同空间区域相干叠加。调节相位优化算法的约束参量, 使得每个通道的联合变换功率谱互不干扰, 可实现  $N$  个通道的并行处理。分析了不同优化相位的傅里叶谱的局域峰值杂波均值和相关输出的峰值位置变化标准差之间的关系, 并将其作为相位优选的依据。研究结果表明, 在所提实验和数值模拟参数条件下, 多通道联合变换相关识别系统可以在不增加经典相关识别系统复杂度的前提下, 实现 16 通道的并行处理, 这对光学相关器的实用化具有重要意义。

**关键词** 傅里叶光学; 光学模式识别; 多通道联合变换相关器; 相位优化算法; 功率谱压缩-平移

中图分类号 O438; TP751

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2207001

## Recognition method for Optical Multiple Channeled Joint Transform Correlation Based on Compression and Translation of Power Spectrum

Lin Chao<sup>1\*</sup>, Lou Shuli<sup>2</sup>, Hua Binbin<sup>3</sup>, Liu Pei<sup>1</sup>, Zhang Wenlong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Aviation Operations and Support, Naval Aviation University, Yantai, Shandong 264000, China;

<sup>2</sup> School of Opto-Electronic Information Science and Technology, Yantai University, Yantai, Shandong 264000, China;

<sup>3</sup> Unit 32200 of PLA, Jinzhou, Liaoning 121000, China

**Abstract** In order to make full use of the spatial-spectral bandwidth of optical correlation recognition system and to enhance the parallel processing efficiency and recognition accuracy of optical correlation recognition technology, a recognition method for multiple channeled joint transform correlation is proposed based on the compression and translation of power spectra, in which the standard deviation of the variation of position of correlation peak is derived to act as a new criterion for correlation recognition. The scene image and  $N$  reference images are first uploaded on the different zones of the input spatial light modulator. Then, the optimized phase maps using the iterative algorithm are superimposed onto the images. In the Fourier plane, interference will occur between the Fourier spectrum of the scene image and that of every single reference image within different zones of the Fourier plane. No interference of Fourier spectra among the reference images will appear when the restriction parameter is suitably adjusted in the phase optimization algorithm. As a result, the  $N$  channeled parallel processing without crosstalk is achieved. The relationship between the localized peak clutter mean of the Fourier spectrum with the optimized phase and the standard deviation of the variation of position of correlation peak is analyzed and utilized as a criterion for the

收稿日期: 2021-04-07; 修回日期: 2021-05-14; 录用日期: 2021-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(62005318)

通信作者: \*vestigelinchao@163.com

selective preference on the optimized phase mask. The results indicate that the proposed multiple channeled joint transform correlator can achieve 16-channel correlation recognition without the increase of system complexity compared with the classical optical correlator under specific experimental conditions, which is quite important for the practicality of an optical correlator.

**Key words** Fourier optics; optical pattern recognition; multiple channeled joint transform correlator; phase optimization algorithm; compression and translation of power spectrum

**OCIS codes** 070.5010; 200.4960; 100.4994

## 1 引言

大数据和智能化时代对信息获取、传输、处理和显示的实时性要求越来越高。基于数字图像处理的目标识别技术在处理海量图像数据时严重依赖并行多核心处理器,其处理时间随着图像尺寸的增大迅速增加,影响了目标识别的时效性。光学模式识别技术的发展为上述问题提供了解决方案,光学信息处理系统具有天然的二维并行处理能力以及大容量信息互连和传输能力,可以实现对图像的超快并行处理。随着光电子技术的发展,产生了两类光学模式识别方法,分别是基于光电相关器的模式识别<sup>[1]</sup>和基于光学神经网络的模式识别<sup>[2]</sup>。研究表明,目前最快的基于集成电路的快速傅里叶(FFT)器件,对典型图像的处理时间超过 6 ms,基于神经网络的图像识别系统需要 26 ms 以上的时间来识别相关特征<sup>[3-4]</sup>,这一时间随着图像数据或视频帧数的增加而迅速增加。而对于光电混合相关器(hybrid opto-electronic correlator, HOC),即使考虑到空间光调制器(spatial light modulator, SLM)的刷新率及电子器件的延迟,其处理时间仍能达到 5  $\mu$ s 量级<sup>[5]</sup>。虽然 HOC 在实现复杂数学算法和识别图像精细特征方面没有优势,但是 HOC 可以作为通用电子器件的协处理器,用于对海量图像进行预先筛选。因此,研究进一步提高 HOC 系统处理速度和精度的方法具有重要意义。

基于 HOC 的识别方法分为线性相关(linear correlation, LC)<sup>[6]</sup>识别和非线性相关(morphological correlation, MC)<sup>[7]</sup>识别两类。LC 识别又分为范德鲁格特相关器(Vander Lugt correlator, VLC)<sup>[8]</sup>和联合变换相关器(joint transform correlator, JTC)<sup>[9]</sup>,分别基于频域和空域实现相关识别。VLC 光路结构简单、识别准确率高,然而,由于需要预先制作大量匹配滤波器且需要精确对准,实时性不强且容易受到振动影响而产生失配。JTC 系统光路结构简单、稳定且无需匹配滤波器的精确对准,适合对实时性要求高的场合。然而,其缺点主要包括:1)相关输

出面存在很强的零级项,其强度一般比互相关峰高至少四倍,严重影响了互相关峰的识别;2)光能利用率低,在输入面和相关输出面都会浪费一部分光能;3)相关峰旁瓣较大,相关峰能量分散不集中,不利于对峰值的鉴别,导致识别能力下降;4)输入 SLM 的空间带宽利用率较低,输入场景图像和参考图像必须间隔一定距离才能使互相关峰远离零级和共轭项,导致输入 SLM 中用于显示有效图像的像素数受限,限制了系统的空间带宽利用率;5)对畸变目标和相似目标的鉴别率较低,当同一目标发生姿态或强度的变化时,互相关峰值会降低;6)当场景中存在多重目标时,相关输出面出现大量自相关点和互相关点,使得系统的识别能力下降。针对上述问题,研究人员提出了多种不同的解决方法,典型的技术有功率谱二值化技术<sup>[10]</sup>、啁啾调制技术<sup>[11]</sup>、相移技术<sup>[12]</sup>、微分处理技术<sup>[13]</sup>、功率谱相减技术<sup>[14]</sup>、马赫-曾德尔干涉技术<sup>[15]</sup>、条纹调整技术<sup>[16]</sup>、纯相位编码技术<sup>[17]</sup>、码分复用技术<sup>[18]</sup>、隔行交错编码技术<sup>[19]</sup>等。这些技术能有效消除零级干扰并减小互相关峰的旁瓣宽度<sup>[10-16]</sup>,提高 JTC 系统的光能和带宽利用率<sup>[17-19]</sup>,提高 JTC 系统的识别能力。然而,上述大多数方法是基于预处理或后处理的在线非线性图像处理算法,一定程度上削弱了 JTC 实时性强的优势,且某些方法可能产生虚警<sup>[20]</sup>。

提高 JTC 在空域和频域的带宽利用率是提高其并行处理速度和实现实时性的关键。在提高空间带宽利用率方面,研究人员将多组场景-参考图像对加载到输入 SLM 上,利用达曼光栅将均匀相干平面波分束为具有相同强度的互不重叠的二维光束阵列,每个光束照明一组场景-参考图像对,经傅里叶变换后其功率谱被写入光寻址 SLM,相关输出时各个通道互不干扰,进而实现了多通道 JTC<sup>[21]</sup>。该方法可用于多目标探测和识别,降低多目标识别带来的虚警。但是,理论上任意图像的傅里叶谱的带宽是有限的,因此多通道的联合变换功率谱(joint transform power spectrum, JPS)在频谱面存在相互叠加的情况。另一种方法基于电寻址 SLM 的像素

结构,在对光进行衍射时产生高阶衍射级,将 SLM 像素结构的填充因子作为调控参量,具有 100% 填充因子的参考图像和 25% 填充因子的场景图像经过傅里叶变换,场景-参考图像的零级衍射叠加生成 JPS;再利用棱镜或光楔将另一幅参考图像的傅里叶谱平移并叠加到场景图像的一级衍射项上;通过调节场景图像和参考图像的谱宽和 SLM 填充因子,实现零级 JPS 和一级 JPS 在空间上的分离,利用光寻址 SLM 记录各通道 JPS,从而实现多通道 JTC<sup>[22]</sup>。该方法需要精确调节输入面图像的灰度分布,且需要定制填充因子的 SLM,实现难度较高。还有研究人员分析了 JTC 对多场景-多参考图像对的识别性能,通过分析三组场景-参考图像对的 36 个相关输出项,精确定位感兴趣的互相关峰的位置,实现了彩色图像的多通道 JTC 识别<sup>[23]</sup>。此外,研究人员利用菲涅耳波带片、电寻址 SLM 和傅里叶透镜构成光学倍增器,将场景图像复制成多个并写入光寻址 SLM,与其上加载的多个参考图像进行联合变换相关操作,通过合理设计菲涅耳波带片的参数,避免不同通道高低阶衍射项的叠加,实现了多通道 JTC 识别<sup>[24]</sup>。然而上述方法需要特殊设计的波带片,光路结构较为复杂,调校难度高。

多通道 JTC 充分发挥了 HOC 并行处理的优势,然而,上述多通道 JTC 方法只是对照明光束或输入图像进行调控,没有对其傅里叶谱进行调控,任意图像的傅里叶谱带宽是无限大的,必然会产生串扰和叠加,无法真正实现不同通道的完全独立处理。另外,基于功率谱叠加的多通道光学相关器需要对相关输出面的各输出项进行精确区分,对输入面图像的相对位置要求也较高,限制了通道的个数。

为了提高 JTC 的并行处理效率和识别准确度,本文提出了基于功率谱压缩-平移的多通道 JTC 方法,将迭代算法优化后的随机相位函数叠加到输入场景和参考图像上,实现了频域内 JPS 带宽的压缩,结合空域的相移因子,实现了频谱面几乎无串扰的 JPS 空分复用,显著提高了 JTC 在空域和频域的带宽利用率。本文所提出的并行处理方法原则上可以应用到已有的基于单通道 JTC 的识别系统<sup>[25-26]</sup>或测量系统<sup>[27-28]</sup>中对其进行并行加速,具有一定的通用性,提升了 JTC 系统的并行处理效率和实用性。

## 2 原 理

为了实现对 JTC 系统空间带宽的充分利用,

本文在输入面加载一幅场景图像和  $N$  幅参考图像,参考图像中包含所需识别的正确目标。 $N$  个通道并行处理要求场景图像和每一幅参考图像单独进行联合变换相关操作,生成联合变换功率谱且参考图像之间不发生联合变换相关操作。因此,基于傅里叶变换的位移性质,本文在输入图像上叠加线性相位来精确调控输入面每一个通道图像傅里叶谱的空间位置,使场景图像的傅里叶谱和每一幅参考图像的傅里叶谱在电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)光敏面的不同位置叠加且参考图像的傅里叶谱互不叠加。另外,理论上,任意图像的傅里叶谱带宽是无限的,因此,经典 JTC 系统的 JPS 也是无限的,在相关输出时具有一定的冗余性,即采用部分 JPS 就能实现相关识别。为了实现对 JTC 系统频谱带宽的充分利用,本文通过优化输入面相位函数对 JPS 进行压缩,减少不同通道 JPS 在 CCD 光敏面上的串扰叠加,从而降低相关输出时不同通道之间的串扰。总之,在不增加经典 JTC 系统硬件复杂度且保证其性能的前提下,通过充分利用光路中的可控参量,实现了多通道并行处理,提高了系统的处理速度和效率。下面结合光路结构和数学模型具体分析其工作原理。

### 2.1 联合功率谱的并行记录

多通道联合变换相关器(multiple channeled JTC, MC-JTC)可由图 1 所示装置实现。将场景图像和  $N$  幅参考图像同时加载到纯振幅空间光调制器(amplitude only spatial light modulator, AO-SLM)上,将用于实现多通道并行处理的优化相位模板加载到纯相位空间光调制器(phase only spatial light modulator, PO-SLM)上,采用  $4f$  中继投影系统将 AO-SLM1 的后表面投影到 PO-SLM 的前表面,通过合理调节两个 SLM 前后 4 个偏振片的透光方位,实现复振幅调制。PO-SLM 的后表面置于傅里叶透镜(Fourier lens, FL)的前焦平面上,经准直相干光照明后由傅里叶透镜进行二维傅里叶变换,其联合变换功率谱由置于傅里叶透镜后焦平面的 CCD1 记录,并输出到计算机进行显示。分别记录场景图像和每一幅参考图像单独的傅里叶谱的强度分布,在计算机中对 JPS 进行清零级和条纹调整等图像处理,将处理后的 JPS 加载到空间光调制器 AO-SLM2 上,经准直相干光照明,通过傅里叶透镜作傅里叶逆变换,由 CCD2 采集其相关输出并在计算机上显示。

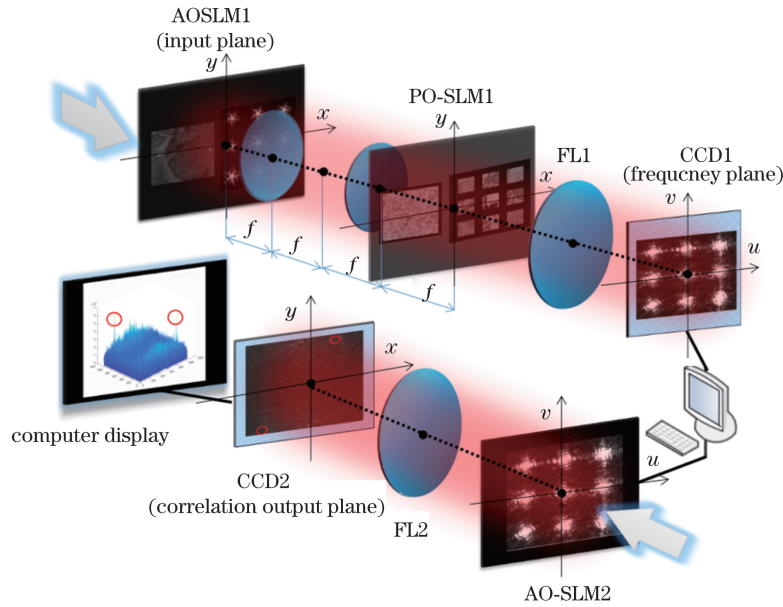


图 1 九通道联合变换相关器的三维光路图

Fig. 1 3D optical setup of nine-channel JTC

理论上,场景图像和参考图像都具有无限大的频谱带宽,即其在频谱面上占据的空间范围是无限的,因此,要实现无串扰的多通道并行处理,必须限制图像傅里叶频谱的空间范围和空间位置,从而可以在输入 SLM 面积和 CCD 感光面积一定的条件下实现多通道并行处理。

本文采用 GS(Gerchberg-Saxton)迭代算法来约束图像傅里叶谱的空间范围。而对图像傅里叶谱的空间位置进行调控,既可以采用线性相位函数对傅里叶谱进行平移,也可以在相位优化过程中直接在频谱面的不同区域内进行约束,后续研究表明,两者效果基本一致。相位迭代优化算法的流程如图 2 所示,其中 FT 表示傅里叶变换,IFT 表示傅里叶逆变换, $p_n(x,y)$ 表示第  $n$  次迭代得到的相位函数,

$P_n(u,v)$ 表示  $p_n(x,y)$ 的傅里叶变换结果, $P'_n(u,v)$ 表示对  $P_n(u,v)$ 进行压缩限制操作后得到的傅里叶频谱, $p'_n(x,y)$ 为  $P'_n(u,v)$ 的傅里叶逆变换结果。

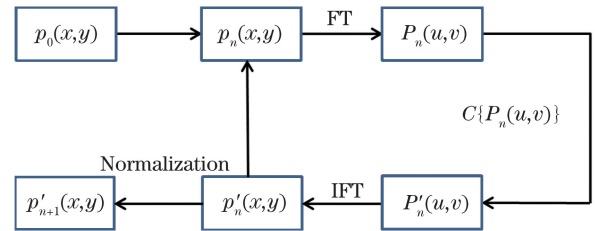


图 2 相位优化算法的流程

Fig. 2 Flow chart of phase optimization algorithm

首先,建立一个初始随机相位函数  $p_0(x,y)$ ,其中  $(x,y)$ 表示空域坐标,通过傅里叶变换得到其傅里叶谱:

$$P'_n(u,v) = C\{P_n(u,v)\} = \begin{cases} P_n(u,v), & (u,v) \in \left(u_j - \frac{1}{2}u' : u_j + \frac{1}{2}u', v_j - \frac{1}{2}v' : v_j + \frac{1}{2}v'\right) \\ 0, & (u,v) \notin \left(u_j - \frac{1}{2}u' : u_j + \frac{1}{2}u', v_j - \frac{1}{2}v' : v_j + \frac{1}{2}v'\right) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $(u,v)$ 表示 CCD 面频域坐标; $C$ 表示频谱面上的压缩限制操作; $(u_j,v_j)$ 表示第  $j$  个通道傅里叶谱中心点的像素坐标; $(u',v')$ 表示限制区域的像素坐标,如图 3 所示。频谱面上的压缩限制操作  $C$ 表示将压缩限制区域以外的傅里叶谱赋 0 值,位于压缩限制区域以内的傅里叶谱保留原值。对压缩后的傅里叶谱进行傅里叶逆变换回到空域,对逆变换后

的结果进行振幅归一化处理,完成一次迭代过程。经过  $n$  次迭代后,得到优化后的相位函数  $p'_{n+1}(x,y)$ 。

设场景图像的振幅透过率分布函数为  $s(x-x_1,y-y_1)$ ,其中  $(x_1,y_1)$ 表示场景图像中心距 AO-SLM1 中心的距离。 $N$  幅参考图像的振幅透过率分布函数为  $\sum_{j=1}^N r_j(x+x'_j,y+y'_j)$ ,将第  $j$

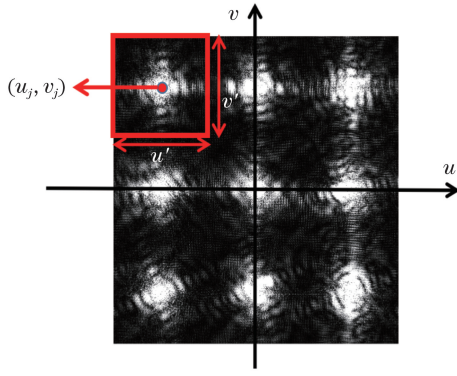


图 3 频谱面功率谱压缩示意图

Fig. 3 Schematic of compression of JPS in Fourier plane

幅参考图像加载到系统的第  $j$  个通道, 则  $(x'_j, y'_j)$  表示第  $j$  幅参考图像中心距 AO-SLM1 中心的距离。  $\sum_{j=1}^N p_j^s(x-x_1, y-y_1)$  为采用 GS 迭代算法得到的叠加到场景图像上的优化相位函数,  $\sum_{j=1}^N p_j^r(x+x'_j, y+y'_j)$  表示采用 GS 迭代算法得到的分别叠加到  $N$  幅参考图像上的优化相位函数, 其中场景图像和  $N$  幅参考图像加载到 AO-SLM1 上, 优化相位加载到 PO-SLM 上。经傅里叶变换, 在 CCD 光敏面得到的联合功率谱分布为

$$I_{\text{JPS}} = \left| \mathfrak{F} \left\{ \sum_{j=1}^N [s(x-x_1, y-y_1) \cdot p_j^s(x-x_1, y-y_1)] + \sum_{j=1}^N [r_j(x+x'_j, y+y'_j) \cdot p_j^r(x+x'_j, y+y'_j)] \right\} \right|^2 = \left| \sum_{j=1}^N \mathfrak{F}[s(x, y) \cdot p_j^s(x, y)] \cdot \exp[i2\pi(ux_1 + vy_1)] + \sum_{j=1}^N \mathfrak{F}[r_j(x, y) p_j^r(x, y)] \cdot \exp[-i2\pi(ux'_j + vy'_j)] \right|^2, \quad (2)$$

式中:  $\mathfrak{F}$  表示傅里叶变换运算。

为了进一步提高相关输出性能, 本文引入消零级和条纹调整 JTC 来实现多通道并行处理, 其

算法流程如图 4 所示, 其中  $\Sigma$  表示矩阵(图像)求和操作,  $-$  表示矩阵相减操作,  $\times$  表示矩阵乘法操作。

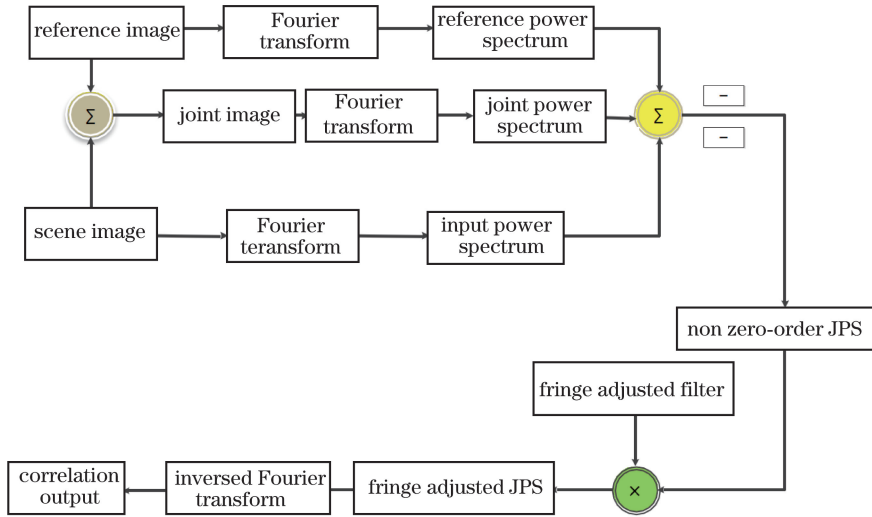


图 4 消零级和条纹调整 JTC 的算法框图

Fig. 4 Flow chart of elimination of zero-order terms and fringe adjusted JTC

消零级且未加条纹调整的第  $j$  个通道的联合变换功率谱(un-fringe adjusted JPS, UFA-JPS)为

$$I_{\text{UFA-JPS}}^j = \mathfrak{F}[s(x, y) \cdot p_j^s(x, y)] \cdot \exp[i2\pi(ux_1 + vy_1)] \mathfrak{F}^* [r_j(x, y) p_j^r(x, y)] \exp[i2\pi(ux'_j + vy'_j)] + \mathfrak{F}^* [s(x, y) \cdot p_j^s(x, y)] \exp[-i2\pi(ux_1 + vy_1)] \mathfrak{F}[r_j(x, y) p_j^r(x, y)] \exp[-i2\pi(ux'_j + vy'_j)] = \mathfrak{F}[s(x, y) \cdot p_j^s(x, y)] \cdot \mathfrak{F}^* [r_j(x, y) p_j^r(x, y)] \exp\{i2\pi[u(x_1 + x'_j) + v(y_1 + y'_j)]\} + \mathfrak{F}^* [s(x, y) \cdot p_j^s(x, y)] \cdot \mathfrak{F}[r_j(x, y) p_j^r(x, y)] \exp\{-i2\pi[u(x_1 + x'_j) + v(y_1 + y'_j)]\}. \quad (3)$$

令  $A = \mathfrak{F}[s(x, y) p_j^s(x, y)]$ ,  $B = \mathfrak{F}[r_j(x, y) \cdot p_j^r(x, y)]$ , 则(3)式可以简化为

$$I_{\text{UFA-JPS}}^j = 2 |A| \cdot |B| \cos\{\phi_A - \phi_B + 2\pi[u(x_1 + x'_j) + v(y_1 + y'_j)]\}, \quad (4)$$

式中:  $\phi_A, \phi_B$  表示  $A$  和  $B$  的相位;  $\mathfrak{F}^*$  表示傅里叶变换的共轭。条纹调整后的第  $j$  通道联合变换功率谱表示为

$$I_{\text{FA-JPS}}^j = \frac{2 |A| \cos\{\phi_A - \phi_B + 2\pi[u(x_1 + x'_j) + v(y_1 + y'_j)]\}}{|B|}. \quad (5)$$

## 2.2 相关识别输出

由于经过迭代优化后,图像傅里叶谱的能量主要集中在约束区域内(本文约束区域内的能量占频谱面总能量的 67%),不同通道 JPS 相互叠加的能量

$$\begin{aligned}
 G(x, y) &= \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \frac{2|A|}{|B|} \cos \{ \phi_A - \phi_B + 2\pi [u(x_1 + x'_j) + v(y_1 + y'_j)] \} \right\} = \\
 &\mathfrak{F}^{-1} \left( \frac{|A|}{|B|} \right) * \mathfrak{F}^{-1} [e^{i(\phi_A - \phi_B)} \cdot e^{ic} + e^{-i(\phi_A - \phi_B)} \cdot e^{-ic}] = \\
 &\mathfrak{F}^{-1} \left( \frac{|A|}{|B|} \right) * \left\{ \mathfrak{F}^{-1} [e^{i(\phi_A - \phi_B)}] * \mathfrak{F}^{-1} (e^{ic}) + \mathfrak{F}^{-1} [e^{-i(\phi_A - \phi_B)}] * \mathfrak{F}^{-1} (e^{-ic}) \right\} = \\
 &\mathfrak{F}^{-1} \left[ \frac{|A|}{|B|} \cdot e^{i(\phi_A - \phi_B)} \right] * \delta(x - c_x, y - c_y) + \mathfrak{F}^{-1} \left[ \frac{|A|}{|B|} \cdot e^{-i(\phi_A - \phi_B)} \right] * \delta(x + c_x, y + c_y), \quad (6)
 \end{aligned}$$

式中:  $\mathfrak{F}^{-1}$  表示傅里叶逆变换;  $*$  表示卷积运算;  $c_x = x_1 + x'_j, c_y = y_1 + y'_j; \delta(\cdot)$  表示脉冲函数。相关输出峰值强度 (CPI, Correlation Peak Intensity) 表示为  $C_{\text{CPI}} = |G(x, y)|_{\text{max}}$ 。

在经典 JTC 系统中,当场景图像和参考图像相同,即  $s(x, y) = r_j(x, y)$  时, CPI 为脉冲函数,表现为很强的相关峰。然而,对于本文提出的 MC-JTC 系统,由(6)式可知,即使场景图像和某一幅参考图像相匹配,由于优化相位函数  $p_j^s(x, y) \neq p_j^r(x, y)$ ,因此  $A \neq B$ , CPI 数值下降,但是通过对优化相位函数进行优选,仍然能够实现正确的相关输出。除了相位函数的影响外,不同通道仍然存在一定程度的串扰,相当于在上述相关输出中再叠加一个噪声项,分析表明,该噪声项对相关输出的影响较小。

## 3 结果及讨论

上文对多通道联合变换相关器的原理进行了研究和探讨。从数学模型来看,基于 JPS 压缩-平移的 MC-JTC 和经典 JTC 的区别在于:1) MC-JTC 在输入图像上叠加了优化相位函数,由(6)式可知,该函数会影响相关输出峰值强度 CPI。由于迭代初始值不同,因此每次优化后的相位分布不同且具有一定的随机性,该优化相位对相关输出的影响相当于在相关输出面上叠加了一个随机噪声。2) 压缩操作导致图像的傅里叶谱丢失,且压缩-平移不可能使图像傅里叶谱的能量完全集中到约束区域,因此不同通道间存在一定程度的串扰,这一串扰相当于在相关输出面上叠加了一个随机噪声。

关于输入联合图像,本文选择公开的遥感图像作为场景图像,其尺寸为  $450 \text{ pixel} \times 450 \text{ pixel}$ ,如图 5(a)左侧场景图像所示。从场景图像中选取待识别的目标作为参考图像,其尺寸为  $80 \text{ pixel} \times$

很小。因此,主要分析第  $j$  个通道的相关输出特性。

对条纹调整的联合变换功率谱进行傅里叶逆变换,令  $c = 2\pi[u(x_1 + x'_j) + v(y_1 + y'_j)]$ ,可得最终的相关输出:

80 pixel,如图 5(a)右侧第三个目标图像所示,4 个参考图像中仅包含一个正确目标,其他通道都是错误目标,以此来验证本方法能否将正确目标识别出。验证方法的有效性之后,进一步将待识别目标的状态畸变图像加载到其他通道,实现畸变目标的识别,提高识别的准确率。需要说明的是,本文主要关注所提方法的有效性,对于畸变目标的识别将在后续研究中深入分析。

理论分析、数值模拟和实验中的软硬件参数为:输入 SLM 的分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ ,像素尺寸  $8 \mu\text{m}$ ; CCD 的分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ ,像素尺寸为  $10 \mu\text{m}$ ; 相位优化算法的初始值由 MATLAB 中的均匀随机数函数 rand 生成;为了使不同通道在频谱面上叠加的能量尽可能小,对于任意通道数,傅里叶面的限制区域统一为  $(u, v) = (32, 32)$ ,考虑到 CCD 可以记录的动态范围和饱和效应,该限制区域基本能够保证不同通道串扰叠加的能量不被 CCD 记录,即 CCD 只记录单个通道的功率谱,基本没有通道之间的串扰;为了保证有足够的能量被用于进行相关输出,对于不同通道数  $N$ ,选取傅里叶逆变换的空间范围为  $(1024/N, 1024/N)$ 。基于上述条件,我们分别选取  $N = 4, 9, 16$  三种情况进行研究。需要说明的是,最大可并行处理的通道数  $N$  由多个因素共同决定,主要包括:场景图像尺寸、参考图像尺寸、输入 SLM 尺寸决定了空域最多可以加载的参考图像数量;参考图像在 SLM 上的摆放和加载位置;CCD 尺寸以及压缩算法的约束条件决定了频域最多可以记录的无串扰通道数。一般来说,SLM 和 CCD 的尺寸相对于图像的尺寸越大,可以并行处理的通道数  $N$  越多。当然,实际最大可并行处理的通道数  $N$  还需要根据系统对不同典型目标识别率的要求进行调控。一般特

定目标及其畸变形态的识别率要求越高,可以并行处理的最大通道数  $N$  越小,因为功率谱压缩-平移算法本质上会使目标的频谱信息部分丢失,所以系统对特定目标的识别率降低。

### 3.1 压缩-平移对相关识别的影响分析

由于压缩本质上是有损的,且会降低 CPI,因此通过对比分析不压缩直接平移 JPS 的多通道 JTC 和经典单通道 JTC 两种情况下的相关输出性能,证明压缩-平移的必要性。

当通道数  $N=4$  时,假设场景图像中存在与第三个通道位置的参考图像相同的目标(图 5 中为一固定建筑物),其余三个通道的参考图像均不存在于场景图像中,如图 5(a)所示。采用 GS 算法迭代得到的优化相位如图 5(b)所示。基于(1)~(5)式,得到压缩-平移后的联合功率谱分布如图 5(c)所示,可以看出,压缩后 JPS 的主要能量集中在约束区域内,通道间的串扰很小。当不压缩 JPS 而直接将四个通道的 JPS 在 CCD 面上进行平移时,不同通道之间的串扰很大,如图 5(d)所示,其中第三个通道的相关输出如图 5(e)所示,作为对比,经典单通道 JTC 的相关输出如图 5(f)所示。

图 5(e)~(f)表明,相比于经典 JTC 的单通道相关输出,不压缩直接平移 JPS 的相关输出面的背景噪声较强,主要原因是无压缩的平移导致不同通道 JPS 相互叠加的能量较高,相关输出的串扰噪声增大。但是对四通道来说,相对于一定的 CCD 记录面积,串扰相对较小,所以仍然能够实现正确图像的相关识别。

当通道数  $N=9$  时,假设场景图像中存在与第五个通道位置的参考图像相同的目标,其余 8 个通道的参考图像均不存在于场景图像中,如图 6(a)所示。采用 GS 算法迭代得到的优化相位如图 6(b)所示。压缩-平移后的联合功率谱分布如图 6(c)所示。当不压缩 JPS 而直接将 9 个通道的 JPS 在 CCD 面上进行平移时,不同通道之间的串扰很大,如图 6(d)所示。

对比不压缩直接平移 JPS 的相关输出和经典 JTC 的相关输出,如图 6(e)和图 6(f)所示,在 CCD 记录面积一定的前提下, $N=9$  时不同通道 JPS 的叠加比例相比  $N=4$  时不同通道 JPS 的叠加比例增大,相关输出的串扰噪声显著增加,原来的相关输出峰值被串扰噪声完全掩盖,采用 CPI 无法实现正确的图像识别。

由此可以得出结论,为了实现通道数  $N \geq 9$  的并行处理,压缩和平移操作是必须的。

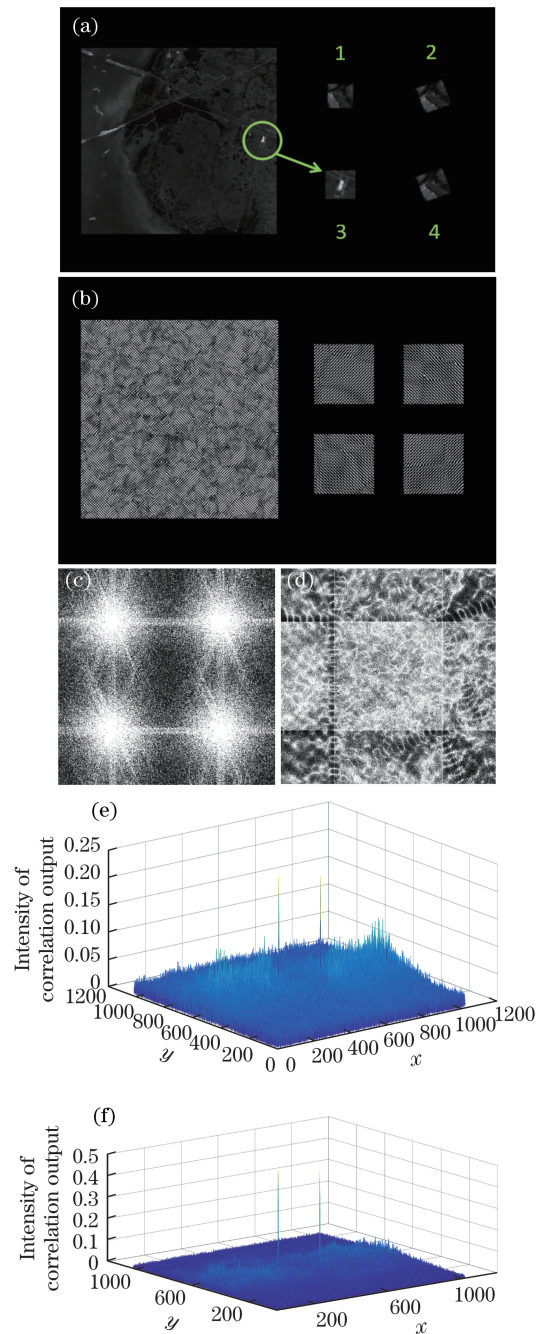


图 5  $N=4$  时的输入图像和相位、频谱面 JPS 和相关输出。(a)输入的联合图像;(b)优化相位;(c)压缩和平移后的频域联合功率分布;(d)未压缩和平移后的频域联合功率分布;(e)未压缩和平移后的相关输出(第三通道);(f)经典 JTC 的相关输出

Fig. 5 Input images and phases, JPS in Fourier plane, and correlation output when  $N=4$ . (a) Input joint images; (b) optimized phases; (c) compressed and shifted JPS in frequency plane; (d) uncompressed and shifted JPS in frequency plane; (e) uncompressed and shifted correlation output (third channel); (f) correlation output of classical JTC

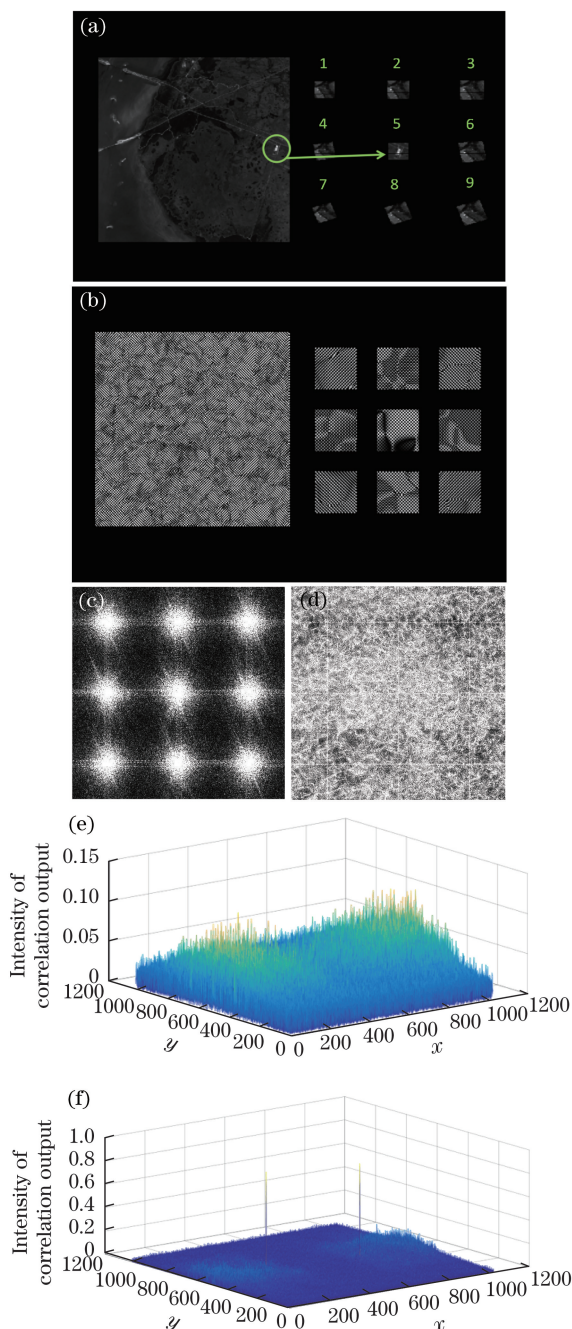


图 6  $N=9$  时的输入图像和相位、频谱面 JPS 和相关输出。(a) 输入的联合图像;(b) 优化相位;(c) 压缩和平移后的频域联合功率分布;(d) 未压缩和平移后的频域联合功率分布;(e) 未压缩和平移后的相关输出(第五通道);(f) 经典 JTC 的相关输出

Fig. 6 Input images and phases, JPS in Fourier plane, and correlation output when  $N = 9$ . (a) Input joint images; (b) optimized phases; (c) compressed and shifted JPS in frequency plane; (d) uncompressed and shifted JPS in frequency plane; (e) uncompressed and shifted correlation output (fifth channel); (f) correlation output of classical JTC

### 3.2 CPI 作为相关识别判据的有效性分析

由原理分析可知,GS 相位优化算法的输出值受初始值的影响较大,而优化相位对 CPI 有影响。因此,迭代初始值对 MC-JTC 系统的相关输出性能有一定影响。取不同的初始值进行多次迭代,每次迭代保持固定的循环次数  $n=100$ ,分析相位初始值对 CPI 的影响。

当  $N=4$  时,随机生成相位初始值,经过 50 次的优化迭代运行,得到 CPI 与运行次数和通道数的关系,如图 7 所示。

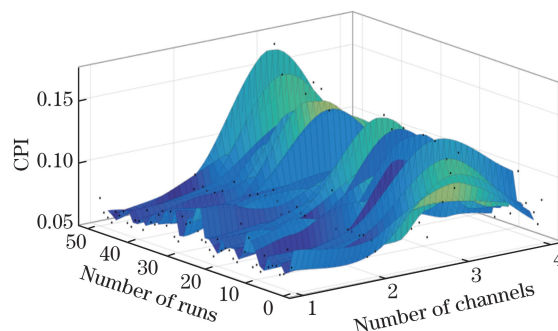


图 7  $N=4$  时 CPI 与运行次数和通道数的关系

Fig. 7 CPI versus number of runs and number of channels when  $N=4$

图 7 表明,正确图像(第三通道)的 CPI 每次运行时都是最大的,即  $N=4$  时采用 CPI 作为相关识别的判据是有效的。当  $N=9$  时,CPI 与运行次数和通道数的关系如图 8 所示。

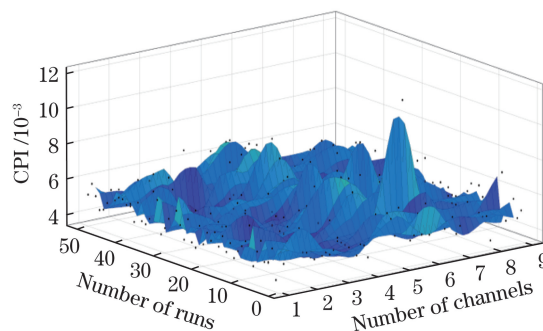


图 8  $N=9$  时 CPI 与运行次数和通道数的关系

Fig. 8 CPI versus number of runs and number of channels when  $N=9$

图 8 表明,在多次运行过程中,大部分情况下正确图像(第五通道)的 CPI 是所有通道中最大的,但在某些相位初始值条件下,正确图像的 CPI 不是所有通道中最大的,而其他通道的参考图像在场景图像中并不存在,即并不是需要识别的目标,因此 9 通道情况下采用 CPI 作为判据不能准确有效地识别出正确目标是否存在。实验发现,在 50 次的优化迭



代运行中,有 12 次正确图像的 CPI 不是最大的,即有 24% 的概率无法有效识别正确图像,该识别准确率不高。考虑到实际光电设备采集的图像还会受到畸变和噪声等影响,导致识别率进一步降低,因此 CPI 无法作为 9 通道并行识别的有效判据。

观察图 7 和图 8 可知,正确通道的 CPI 随优化相位初始值的变化存在较大波动,且通道数越多,波动越大并偏离正确值。

### 3.3 优化相位对相关识别准确性的影响分析

随机选取不同的相位初始值进行迭代,得到不同的优化相位,对比相关输出面上不同优化相位产生的噪声强度以分析优化相位对 CPI 的影响。当  $N=9$  时,随机选取三个优化相位进行相关输出,得到图 9 所示的结果。

作为对比,当  $N=9$  时,分析错误参考图像所在通道的相关输出,如图 10 所示。

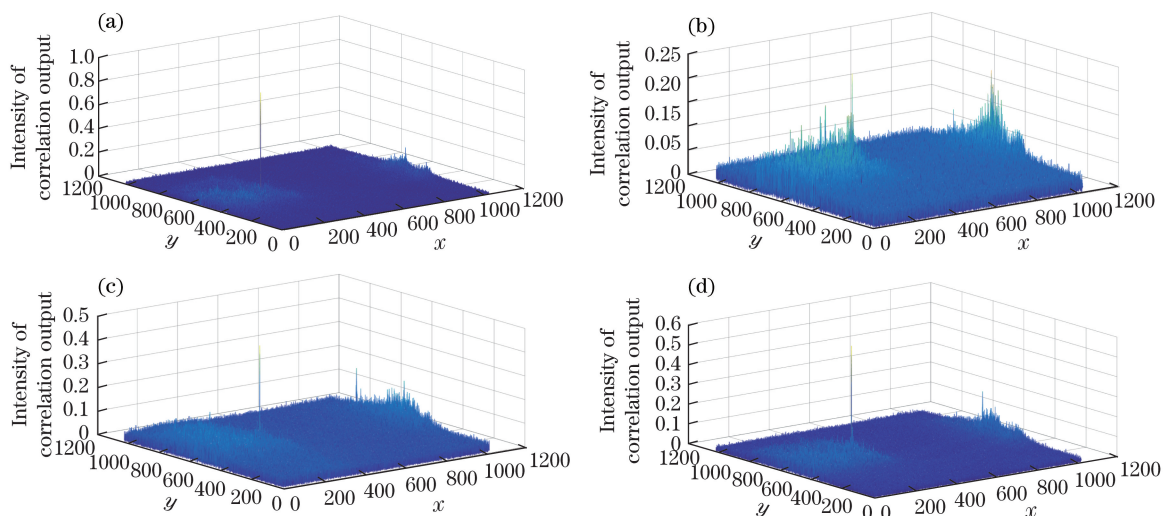


图 9  $N=9$  时不同优化相位对第五通道相关输出的影响。(a)未加优化相位的相关输出;(b)加入优化相位 1 的相关输出;(c)加入优化相位 2 的相关输出;(d)加入优化相位 3 的相关输出

Fig. 9 Influence of optimized phase on correlation output of fifth channel when  $N=9$ . (a) Correlation output without optimized phase; (b) correlation output with optimized phase 1; (c) correlation output with optimized phase 2; (d) correlation output with optimized phase 3

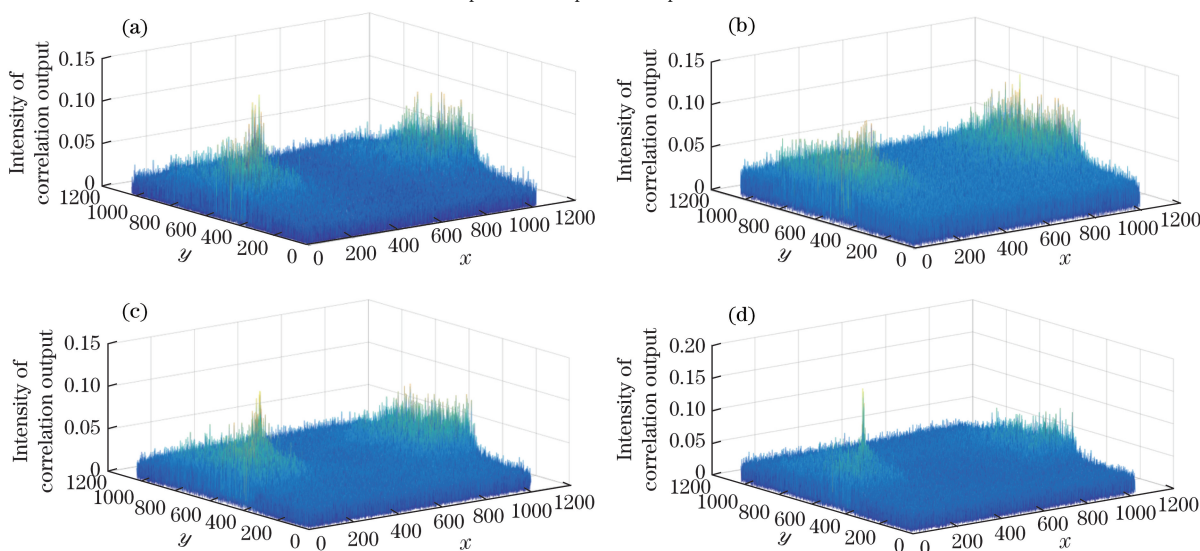


图 10  $N=9$  时,不同优化相位对第三通道相关输出的影响。(a)未加优化相位的相关输出;(b)加入优化相位 1 的相关输出;(c)加入优化相位 2 的相关输出;(d)加入优化相位 3 的相关输出

Fig. 10 Influence of optimized phase on correlation output of third channel when  $N=9$ . (a) Correlation output without optimized phase; (b) correlation output with optimized phase 1; (c) correlation output with optimized phase 2; (d) correlation output with optimized phase 3

图 9 和图 10 表明,有的优化相位产生的叠加噪声较小,对 CPI 的影响较小,如相位 3。而有的优化相位对 CPI 的影响大,如相位 1,即其产生的叠加噪声很大,导致正确参考图像的 CPI 降低,错误参考图像的 CPI 可能超过正确参考图像的 CPI,如图 8 所示。因此,在多通道中处理时必须选择产生叠加噪声较小的优化相位,该相位优选过程对于本文所提出的 MC-JTC 系统是必要的。

本文提出局域峰值杂波均值(localized peak clutter mean,L-PCM)作为相位优选的依据。峰值杂波均值是由相关输出峰值强度与峰值周围一定空间范围内杂波强度之和的比值来定义的,如图 11 所示。

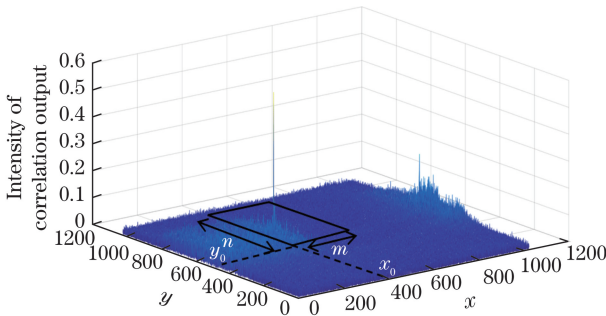


图 11 局域峰值杂波均值示意图

Fig. 11 Schematic of localized peak clutter mean

L-PCM 的定义表示为

$$L_{PCM} = \frac{C_{CPI}}{\frac{1}{m \times n} \sum_{x=x_0}^{x_0+m} \sum_{y=y_0}^{y_0+n} |G(x, y)|}, \quad (7)$$

式中: $m$ 、 $n$  代表所选区域的像素个数; $(x_0, y_0)$  代表所选区域的起始像素位置。

研究表明,某一优化相位在相关输出面上产生的 L-PCM 越大,由其引入的叠加噪声越小,相关识别的准确率越高。

### 3.4 峰值位置变化标准差作为相关识别判据的有效性和准确性分析

上文分析表明,优化相位和叠加串扰导致正确图像的 CPI 被噪声减弱,同时错误图像在相关输出面上的峰值强度可能超过正确图像的 CPI,导致 CPI 作为相关识别判据的有效性降低。为了解决这一问题,根据 JTC 的空变性质,当目标位置不发生变化时,正确图像所在通道的 CPI 值在相关输出面上对应像素的位置是固定的,而错误图像所在通道的峰值强度完全由优化相位决定,当优化相位变化时,其位于输出面上的位置不具有稳定性。基于此,本文将 CPI 在相关输出面上的位置稳定性作为正确识别的依据,提出峰值位置变化标准差(standard

deviation of variation of position of correlation peak, SPCP),即当优化相位的初始值变化时,采用 GS 算法计算得到  $M$  组优化相位,通过连续  $M$  次并行记录和相关输出,计算 MC-JTC 系统相关输出面的 CPI 所在像素位置随  $M$  组输入优化相位的变化。SPCP 的定义为

$$S_{SPCP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (\bar{X} - X_i)^2}{M} + \frac{\sum_{i=1}^M (\bar{Y} - Y_i)^2}{M}}, \quad (8)$$

$x, y$  方向的峰值位置变化标准差为

$$S_{SPCP_x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (\bar{X} - X_i)^2}{M}}, \quad (9)$$

$$S_{SPCP_y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (\bar{Y} - Y_i)^2}{M}}, \quad (10)$$

式中: $X_i, Y_i$  分别为第  $i$  次相关输出时 CPI 所在像素位置的横坐标、纵坐标; $\bar{X}, \bar{Y}$  为  $M$  次相关输出峰值位置的横、纵坐标均值。研究表明,SPCP 受优化相位的影响很大,基于(7)式计算不同优化相位的 L-PCM,基于(8)~(10)式计算相应相位下的 SPCP,得到的 SPCP 和 L-PCM 的关系曲线如图 12 所示。

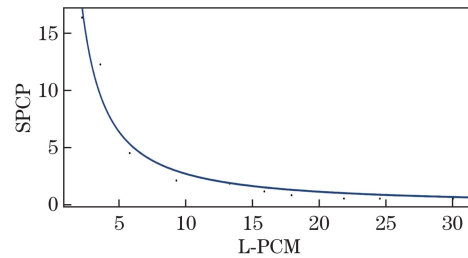


图 12  $N=9$  时,正确图像的 SPCP 和 L-PCM 的关系曲线

Fig. 12 SPCP versus L-PCM for right image when  $N=9$

图 12 表明,当选取 L-PCM 较大的相位作为优化相位时,SPCP 的数值显著减小,即正确图像所在通道相关输出的 CPI 位置波动较小。

当  $N=9$  时,SPCP 的对数随通道数的变化如图 13 所示,其中  $M=3$ 。正确图像所在通道(第五通道)的 SPCP 最小,即 CPI 的位置在每次运行时不发生变化,而错误图像所在通道的 SPCP 很大,即其峰值位置波动很大,因为该峰值位置完全由优化相位产生的叠加噪声决定,具有随机性,根据 3.2 节的研究结果可知,有 24% 的概率无法有效识别正确图像。上述研究表明:当  $N=9$  时,将优选后的优化相位加载到 PO-SLM 上,以 SPCP 作为相关识别的判据是有效的。选取多组优化相位并使其 L-PCM 大

于 20, 计算不同优化相位下的 SPCP 数值, 均能保证正确图像所在通道的 SPCP 数值最小, 而每次运行过程中 CPI 峰值所在通道会发生变化(如图 8 所示)。因此, 在实验室条件下, 当 L-PCM 足够大时, SPCP 作为相关识别判据的识别率可以认为是 100%, 而 CPI 存在 24% 的错误识别概率。由此可以得出结论: SPCP 相比于传统的 CPI 识别判据, 提高了相关识别的准确性和识别率, 可有效降低目标识别过程中的虚警率。

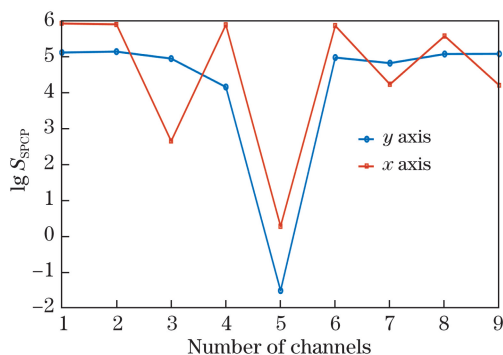


图 13  $N=9$  时  $\lg S_{\text{SPCP}}$  随通道数的变化曲线

Fig. 13  $\lg S_{\text{SPCP}}$  versus number of channels when  $N=9$

为了进一步验证 SPCP 的有效性, 采用 16 通道并行处理来计算不同通道的 SPCP 数值, 其中正确图像所在通道为第十通道, 结果如图 14 所示。图 14 表明, 第十通道图像在  $x, y$  方向的 SPCP 在所有通道中都是最小的, 因此本文提出的峰值位置变化标准差作为 MC-JTC 系统相关识别的判据是有效的。

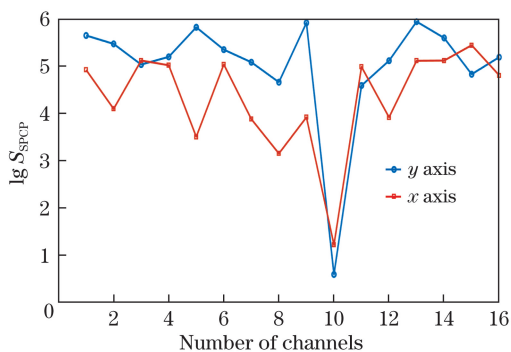


图 14  $N=16$  时  $\lg S_{\text{SPCP}}$  随通道数的变化曲线

Fig. 14  $\lg S_{\text{SPCP}}$  versus number of channels when  $N=16$

综上, 在本实验给定的软硬件参数条件下, 基于 L-PCM 优选输入面的优化相位函数, 并计算每个通道的 SPCP 数值, 以 SPCP 最小值作为 MC-JTC 系统相关识别的判据, 能够在不增加 JTC 系统硬件复杂度的前提下, 充分利用系统的空间和频谱带宽, 将 JTC 系统的并行处理速度提升 16 倍。

## 4 结 论

提出了一种基于联合变换功率谱压缩-平移的多通道光学相关识别方法。该方法将场景图像和  $N$  幅参考图像同时加载到输入 SLM 中, 基于 GS 迭代算法优化输入相位函数, 然后采用局域峰值杂波均值作为评价参量对相位函数进行优选, 将优选后的相位叠加到输入面相应图像上。经过透镜的傅里叶变换, 场景图像的傅里叶谱和每一幅参考图像的傅里叶谱在 CCD 的不同位置叠加且参考图像的傅里叶谱互不叠加, 实现了几乎无串扰的多通道联合变换功率谱记录。在相关输出时, 基于 JTC 的空变性质, 提出峰值位置变化标准差并作为相关识别的判据, 提高了识别的准确性。基于所提的特定实验条件, 该方法在不增加经典光学相关器硬件复杂度的前提下, 实现了 16 通道并行处理, 将系统对给定目标的识别速度提高了 16 倍, 具有潜在的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Manzur T, Zeller J, Serati S. Optical correlator based target detection, recognition, classification, and tracking [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(21): 4976-4983.
- [2] Lin X, Lin X, Rivenson Y, et al. All-optical machine learning using diffractive deep neural networks [J]. *Science*, 2018, 361(6406): 1004-1008.
- [3] Shi W Z, Caballero J, Huszár F, et al. Real-time single image and video super-resolution using an efficient sub-pixel convolutional neural network [C]// 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 27-30, 2016, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2016: 1874-1883.
- [4] Noskov M, Tutatchikov V, Lapchik M, et al. Application of parallel version two-dimensional fast Fourier transform algorithm, analog of the Cooley-Tukey algorithm, for digital image processing of satellite data [J]. *E3S Web of Conferences*, 2019, 75: 01012.
- [5] Monjur M, Tseng S, Tripathi R, et al. Hybrid optoelectronic correlator architecture for shift invariant target recognition [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2013: 41-7.
- [6] Wang Q, Alfalou A, Brosseau C. New perspectives in face correlation research: a tutorial [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2017, 9(1): 1-78.
- [7] Wang Q, Chen L, Zhou J Y, et al. Modified nonlinear morphological correlation using Laplace

- filtering[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(4): 874-881.
- [8] Lugt A V. Signal detection by complex spatial filtering [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1964, 10(2): 139-145.
- [9] Weaver C S, Goodman J W. A technique for optically convolving two functions[J]. Applied Optics, 1966, 5(7): 1248-1249.
- [10] Javidi B, Kuo C J. Joint transform image correlation using a binary spatial light modulator at the Fourier plane[J]. Applied Optics, 1988, 27(4): 663-665.
- [11] Tang Q, Zhang G S. Chirp encoded joint transform correlators with input scale search [J]. Optics Communications, 1994, 107(1/2): 23-27.
- [12] Lu G W, Zhang Z, Wu S D, et al. Implementation of a non-zero-order joint-transform correlator by use of phase-shifting techniques[J]. Applied Optics, 1997, 36(2): 470-483.
- [13] Zhong S, Jiang J X, Liu S T, et al. Binary joint transform correlator based on differential processing of the joint transform power spectrum[J]. Applied Optics, 1997, 36(8): 1776-1780.
- [14] Li C T, Yin S Z, Yu F T S. Nonzero-order joint transform correlator[J]. Optical Engineering, 1998, 37(1): 58-65.
- [15] Cheng C J, Tu H Y. Implementation of a nonzero-order joint transform correlator using interferometric technique[J]. Optical Review, 2002, 9(5): 193-196.
- [16] Alam M S, Karim M A. Fringe-adjusted joint transform correlation[J]. Applied Optics, 1993, 32(23): 4344-4350.
- [17] Erbach P S, Gregory D A, Hammock J B. Phase-only joint-transform correlator: analysis and experimental results[J]. Applied Optics, 1996, 35(17): 3091-3096.
- [18] Zalevsky Z, Rubner A, García J, et al. Joint transform correlator with spatial code division multiplexing[J]. Applied Optics, 2006, 45(28): 7325-7333.
- [19] Zalevsky Z, García J, García-Martínez P. Interlacing multiplexing techniques for optical morphological correlation[J]. Optics Communications, 2006, 264(1): 45-50.
- [20] Yu F T, Cheng F, Nagata T, et al. Effects of fringe binarization of multiobject joint transform correlation [J]. Applied Optics, 1989, 28(15): 2988-2990.
- [21] Feng J H, Chin G F, Wu M X, et al. Multiobject recognition in a multichannel joint-transform correlator[J]. Optics Letters, 1995, 20(1): 82-84.
- [22] Keryer G, de Bougrenet de la Tocnaye J L. A multichannel joint transform correlator [J]. Optics Communications, 1995, 118(1/2): 102-113.
- [23] Deutsch M, García J, Mendlovic D. Multichannel single-output color pattern recognition by use of a joint-transform correlator[J]. Applied Optics, 1996, 35(35): 6976-6982.
- [24] Thapliya R, Koizumi H, Kodate K, et al. Parallel joint transform correlator applied to Devanagari script recognition [J]. Applied Optics, 1998, 37(23): 5408-5415.
- [25] Hong L, Lin F, Qiu X D, et al. Second harmonic generation based joint transform correlator for human face and QR code recognitions[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(23): 231101.
- [26] Yang T, Xu P, Zhou L, et al. Folding reflective 2f system optical correlator [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0107001.  
杨拓, 徐平, 周亮, 等. 折反式 2f 系统光学相关器的研究[J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0107001.
- [27] Yi H W, Li X Y, He T B, et al. Image motion measurements based on intensity superimposition and joint transform correlation approach [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0304003.  
易红伟, 李旭阳, 贺天兵, 等. 强度叠置联合变换相关像移测量方法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0304003.
- [28] Cui H X, Liu L, Liu C. Displacement vector detection method for low altitude dynamic imaging [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0904008.  
崔红霞, 刘丽, 刘畅. 低空动态成像位移矢量探测方法[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0904008.