

余弦编码复用多光谱关联成像技术研究

孙宇松^{1,2,3}, 黄见^{1,3*}, 时东锋^{1,2,3}, 苑克娥^{1,2,3}, 胡顺星^{1,2,3}, 王英俭^{1,2,3}¹中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;³先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 传统多光谱关联成像技术的发展受限于系统结构复杂和数据量大。为提高多光谱图像的复原效率,本文提出了余弦编码复用多光谱关联成像技术。将具有确定频率的余弦结构编码与正交 Hadamard 基图案复用为结构光对目标场景进行调制照明,并用一个宽带光电倍增管收集后向散射信号。在复原过程中,基于余弦编码的傅里叶频移特性可将多通道光谱混叠信息由空间域转换到频率域进行解码分离,最终复原出目标场景的多光谱图像。通过仿真分析了理想低通滤波器、高斯低通滤波器和巴特沃斯低通滤波器对多光谱图像复原质量的影响,并将所提方法与传统方法进行了对比实验。结果表明:所提方法能有效提高多光谱信息的获取效率,缩短图像重建时间;频域滤波时,选用高斯低通滤波器比理想低通滤波器、巴特沃斯低通滤波器更具优势。

关键词 成像系统; 关联成像; 编码复用; 多光谱成像; 低通滤波器

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221008

1 引言

关联成像是一种新兴的计算成像方案,它采用无空间分辨率的探测器获取成像场景的空间信息,并通过符合计算来恢复图像^[1-7]。无空间分辨率探测器具有光谱选择范围大、量子效率高优势,因此,关联成像在传统面阵成像技术无法工作的领域,尤其是非可见光波段,具有潜在的应用价值,受到了国内外的广泛关注。近年来,关联成像在太赫兹^[8-9]、红外^[10-11]、X 射线^[12-13]等领域得到了初步应用,并展现出了其独特的技术特点。

多光谱成像是光谱技术与成像技术的有机结合。相比于单一波段的成像系统,多光谱成像系统获得的目标光谱图像更加丰富,有助于其更加准确、可靠地在目标识别、材料分析和医疗诊断等领域获取信息。目前,多光谱成像技术(包括基于面阵探测器的传统成像技术和关联成像技术)通常在光学后继接收端采用光谱分光的方式使用多个不同中心波长的探测器^[14]或者采用滤光片转轮分时探测的方式^[15]获取相应光谱通道的图像,然后对获得的多个光谱通道的图像进行融合得到物体的多光谱图像。此类多光谱成像技术具有系统结构复杂、数据采集量大、效率低的通病。复用结构照明技术可以显著提高关联成像信息的获取效率,本

课题组在前期研究中提出了用宽带单像素探测器实现多光谱关联成像的多路复用结构照明方法,即:构造三个相互正交的二值化编码矩阵(分别对应红、绿、蓝三色信息)与随机图案^[16]或正交 Hadamard 基图案复用^[17],形成多光谱编码复用结构化照明图案。因此,该方法仅需一个单像素探测器就能捕获目标场景的多维信息,简化了系统结构,大幅减少了数据采集量,同时保证了较高的成像质量。但是,该方法在多光谱图像重构时需要借助压缩感知算法^[18-21]对随机编码对应的欠定方程组进行求解,导致图像复原时间大大增加。Zhang 等^[22]提出了一种基于傅里叶单像素成像(FSI)的多光谱复用成像方法:通过复用对目标的光谱和三维信息进行编码和压缩,利用解算算法实现目标光谱信息的复原。

在前期工作的基础上,本课题组将具有确定性频率特征的余弦结构编码信息引入多光谱关联成像中,提出了余弦编码复用多光谱关联成像技术。该技术的核心是:根据不同数量的光谱通道需求,灵活地构造不同频率的余弦编码矩阵,然后将其与正交 Hadamard 基图案融合生成光谱复用结构光照明图案,用该结构光照明图案对成像物体进行调制照明,并利用一个单像素探测器收集物体的反射信号。图像复原时,先用线性叠加算法恢复目标物体的混叠光谱图像,然后再将

收稿日期: 2022-06-29; 修回日期: 2022-07-30; 录用日期: 2022-08-08; 网络首发日期: 2022-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(U20A20214)、中国科学院青年创新促进会项目(2020438)、中国科学院科技创新重点实验室基金(CXJJ-20S028)、安徽省先进激光技术实验室开放项目(AHL2021ZR01)

通信作者: *jhuang@aiofm.ac.cn

其转换到频域进行各通道信息的重组,进而分别提取目标的多个光谱通道信息,最终将其融合生成目标物体的多光谱图像。在傅里叶频率域分别提取各通道的频谱信息时,低通滤波器参数的选取对复原结果影响较大。通过多组数值仿真分析了不同滤波器对余弦编码复用多光谱关联成像复原质量的影响,结果表明,高斯低通滤波器相对于理想滤波器和巴特沃斯滤波器具有一定优势。最后开展多光谱关联成像实验研究,初步实验结果表明,余弦编码复用多光谱关联成像较传统方法在系统结构、数据量等方面具有显著优势。

2 余弦编码复用多光谱关联成像技术原理

余弦编码复用多光谱关联成像技术通过对不同的光谱信息进行独立编码来同步实现多光谱成像。为了方便通过实验验证所提方法的可行性,以三个光谱通道为例,先构造三个 $N \times N$ 分辨率的余弦结构编码矩阵,这三个矩阵分别对应红色、绿色和蓝色光谱通道。将这三个矩阵分别记为 \mathbf{F}_{red} 、 $\mathbf{F}_{\text{green}}$ 和 \mathbf{F}_{blue} ,它们在计算

机中实现的表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{\text{red}} = \cos(2\pi f_{x_1}x + 2\pi f_{y_1}y + \varphi_0) \\ \mathbf{F}_{\text{green}} = \cos(2\pi f_{x_2}x + 2\pi f_{y_2}y + \varphi_0), \\ \mathbf{F}_{\text{blue}} = \cos(2\pi f_{x_3}x + 2\pi f_{y_3}y + \varphi_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_{x_i} 和 f_{y_i} ($i=1,2,3$) 为编码矩阵的频率; φ_0 为初始相位。编码矩阵的频率组合决定了各通道频谱信息被频移到傅里叶空间中的位置。为了确保每个通道的信息尽可能分离(以减少串扰),在本文的仿真和实验中,编码矩阵的频率组合 (f_{x_i}, f_{y_i}) 均选取为 $(0.5, 0)$ 、 $(0, 0.5)$ 和 $(0.5, 0.5)$, 此时三个编码矩阵都是由 1 和 -1 组成的二值化矩阵。将三个编码矩阵与计算机产生的确定性正交 Hadamard 基图案 \mathbf{H}_i 进行编码融合,将生成的 $\mathbf{F}_{\text{red}} \cdot \mathbf{H}_i$ 、 $\mathbf{F}_{\text{green}} \cdot \mathbf{H}_i$ 和 $\mathbf{F}_{\text{blue}} \cdot \mathbf{H}_i$ 图案分别赋予红色、绿色和蓝色光谱通道,构造出复用三光谱照明图案 \mathbf{P}_i 。

将彩色照明图案 \mathbf{P}_i 加载到调制系统中对宽带光源进行调制,调制后的宽带光源照射成像物体产生的后向散射信号被一个单像素探测器收集。收集的信号表示为 D_i ,

$$D_i = \sum_{i=1}^{N \times N} (r \cdot \mathbf{F}_{\text{red}} \cdot \mathbf{H}_i \cdot \mathbf{m}_{\text{red}} + g \cdot \mathbf{F}_{\text{green}} \cdot \mathbf{H}_i \cdot \mathbf{m}_{\text{green}} + b \cdot \mathbf{F}_{\text{blue}} \cdot \mathbf{H}_i \cdot \mathbf{m}_{\text{blue}}), \quad (2)$$

式中:参数 r 、 g 和 b 分别是单像素探测器对红色、绿色、蓝色光谱的响应系数,可以通过标定获得; \mathbf{m}_{red} 、 $\mathbf{m}_{\text{green}}$ 和 \mathbf{m}_{blue} 分别对应目标物体的三种光谱信息。式(2)可以简化为

$$D_i = \sum_{i=1}^{N \times N} \mathbf{H}_i \cdot \mathbf{m}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{m} 表示融合了编码信息的成像物体混叠光谱图像,可表示为

$$\mathbf{m} = r \cdot \mathbf{F}_{\text{red}} \cdot \mathbf{m}_{\text{red}} + g \cdot \mathbf{F}_{\text{green}} \cdot \mathbf{m}_{\text{green}} + b \cdot \mathbf{F}_{\text{blue}} \cdot \mathbf{m}_{\text{blue}}. \quad (4)$$

对于确定性的正交 Hadamard 基图案 \mathbf{H}_i , 可由线性叠

加算法复原出目标物体 $N \times N$ 分辨率混叠光谱图像 \mathbf{m} , 即

$$\mathbf{m} = \frac{1}{N \times N} \sum_{i=1}^{N \times N} D_i \cdot \mathbf{H}_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \times N. \quad (5)$$

获取 \mathbf{m} 后,如何从分辨率为 $N \times N$ 的 \mathbf{m} 中解码出三个光谱分量 \mathbf{m}_{red} 、 $\mathbf{m}_{\text{green}}$ 和 \mathbf{m}_{blue} 是本技术的核心。鉴于所构造的编码信息具有特定的频谱结构,可以利用傅里叶变换理论进行处理。首先,对混叠光谱图像 \mathbf{m} 作傅里叶变换,将其从空间域转换到频率域。混叠光谱图像 \mathbf{m} 的傅里叶频谱是三个光谱通道频谱的叠加,表示为

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{\mathbf{m}\} = \mathbf{M} = & \mathcal{F}\{r \cdot \cos(2\pi f_{x_1}x + 2\pi f_{y_1}y + \varphi_0) \cdot \mathbf{m}_{\text{red}}\} + \mathcal{F}\{g \cdot \cos(2\pi f_{x_2}x + 2\pi f_{y_2}y + \varphi_0) \cdot \mathbf{m}_{\text{green}}\} + \\ & \mathcal{F}\{b \cdot \cos(2\pi f_{x_3}x + 2\pi f_{y_3}y + \varphi_0) \cdot \mathbf{m}_{\text{blue}}\}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中: \mathcal{F} 表示对图像作二维傅里叶变换; \mathbf{M} 表示混叠光谱图像的傅里叶频谱图。以单个红色通道为例,

$$\mathbf{q}(x, y) = r \cdot \cos(2\pi f_{x_1}x + 2\pi f_{y_1}y + \varphi_0) \cdot \mathbf{m}_{\text{red}}, \quad (7)$$

根据欧拉公式 $\cos x = \frac{1}{2} [\exp(ix) + \exp(-ix)]$, 式(7)可以转化为

$$\mathbf{q}(x, y) = \frac{1}{2} \cdot r \cdot \exp[i(2\pi f_{x_1}x + 2\pi f_{y_1}y + \varphi_0)] \cdot \mathbf{m}_{\text{red}} + \frac{1}{2} \cdot r \cdot \exp[-i(2\pi f_{x_1}x + 2\pi f_{y_1}y + \varphi_0)] \cdot \mathbf{m}_{\text{red}}. \quad (8)$$

对式(8)作傅里叶变换,由相移定理可得

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{\mathbf{q}(x, y)\} = & \mathcal{F}\left\{\frac{r}{2} \cdot \exp[i(2\pi f_{x_1}x + 2\pi f_{y_1}y + \varphi_0)] \cdot \mathbf{m}_{\text{red}}\right\} + \mathcal{F}\left\{\frac{r}{2} \cdot \exp[-i(2\pi f_{x_1}x + 2\pi f_{y_1}y + \varphi_0)] \cdot \mathbf{m}_{\text{red}}\right\} \\ = & \frac{r}{2} \cdot [\mathbf{M}_{\text{red}}(f_x + f_{x_1}, f_y + f_{y_1}) + \mathbf{M}_{\text{red}}(f_x - f_{x_1}, f_y - f_{y_1})]. \end{aligned} \quad (9)$$

因此,混叠光谱图像的傅里叶频谱图 \mathbf{M} 可以表示为

$$M = \frac{r}{2} \cdot [M_{\text{red}}(f_x + f_{x_1}, f_y + f_{y_1}) + M_{\text{red}}(f_x - f_{x_1}, f_y - f_{y_1})] + \frac{g}{2} \cdot [M_{\text{green}}(f_x + f_{x_2}, f_y + f_{y_2}) + M_{\text{green}}(f_x - f_{x_2}, f_y - f_{y_2})] + \frac{b}{2} \cdot [M_{\text{blue}}(f_x + f_{x_3}, f_y + f_{y_3}) + M_{\text{blue}}(f_x - f_{x_3}, f_y - f_{y_3})] \quad (10)$$

在傅里叶空间中,由于三个光谱通道的编码频率组合 (f_x, f_y) 不同,因此,每个光谱分量的频谱信息被频移到不同的高频区域,进而频谱图中会出现三对频点,对应三种光谱通道的频谱最大系数值。将其中一个通道的频谱信息重组到傅里叶域的中心,此时其他两个通道频谱信息位于傅里叶域的边缘,然后用合适的低通滤波器有选择地提取重组后的傅里叶空间低频信息。这样,各光谱通道的频谱信息就被分别提取出来了。对提取到的各通道频谱信息作二维傅里叶逆变换处理,可以得到三个光谱分量图像 m_{red} 、 m_{green} 和 m_{blue} ,即

$$\begin{cases} m_{\text{red}} = \mathcal{F}^{-1}\{B \cdot S_{\text{red}}\} \\ m_{\text{green}} = \mathcal{F}^{-1}\{B \cdot S_{\text{green}}\}, \\ m_{\text{blue}} = \mathcal{F}^{-1}\{B \cdot S_{\text{blue}}\} \end{cases} \quad (11)$$

式中: \mathcal{F}^{-1} 表示对图像作二维傅里叶逆变换; S_{red} 、 S_{green} 和 S_{blue} 为重组后各通道的频谱图; B 表示用低通滤波

器(LPF)提取傅里叶频率域的低频信息。最后融合三个光谱分量图像 m_{red} 、 m_{green} 和 m_{blue} ,便可获得目标物体的多光谱图像。

从上述理论分析可以看出,本方法获取多光谱图像的步骤主要包括三步,如图 1 所示。第一步是调制照明图案的生成,将 Hadamard 基图案和余弦编码矩阵复用生成彩色照明图案。第二步类似于传统的关联成像,用构造的余弦编码复用结构照明图案对物体调制成像,然后利用线性叠加算法获得目标物体的混叠光谱图像。第三步是重建多光谱图像,即:对混叠光谱图像作二维傅里叶变换,将其转换到频率域进行频谱成分重组(为了增加频谱图像的可见度,图 1 中对频谱取绝对值并以对数显示),再通过低通滤波器分别滤取每个通道的低频信息,接着进行二维傅里叶逆变换得到三个光谱分量图像,将三个光谱分量图像融合便可重建出目标物体的多光谱图像。

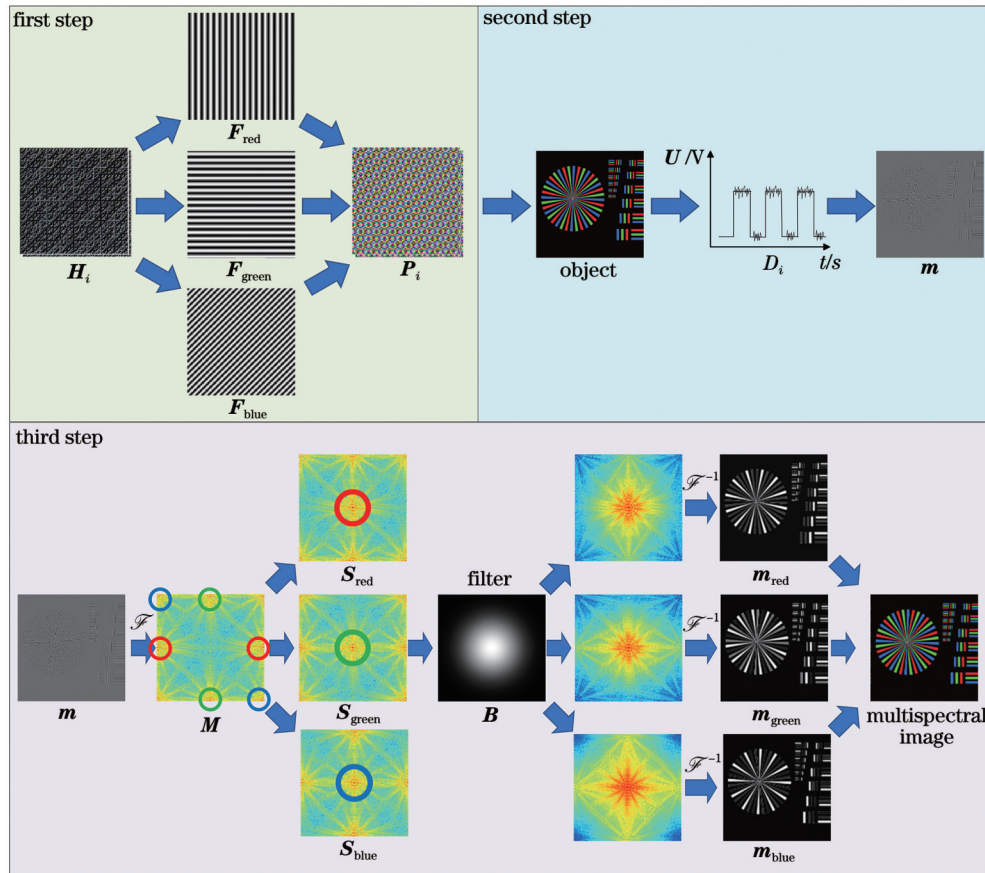


图 1 余弦编码复用多光谱关联成像流程图

Fig. 1 Flow chart of cosinusoidal encoding multiplexed multispectral ghost imaging

3 数值仿真

对余弦编码复用多光谱关联成像技术进行数值

仿真分析。目标物体如图 2(a)~(c)所示,分辨率为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。按照式(1)所述产生三个余弦编码矩阵,并将其与 Hadamard 基图案复用生成一组

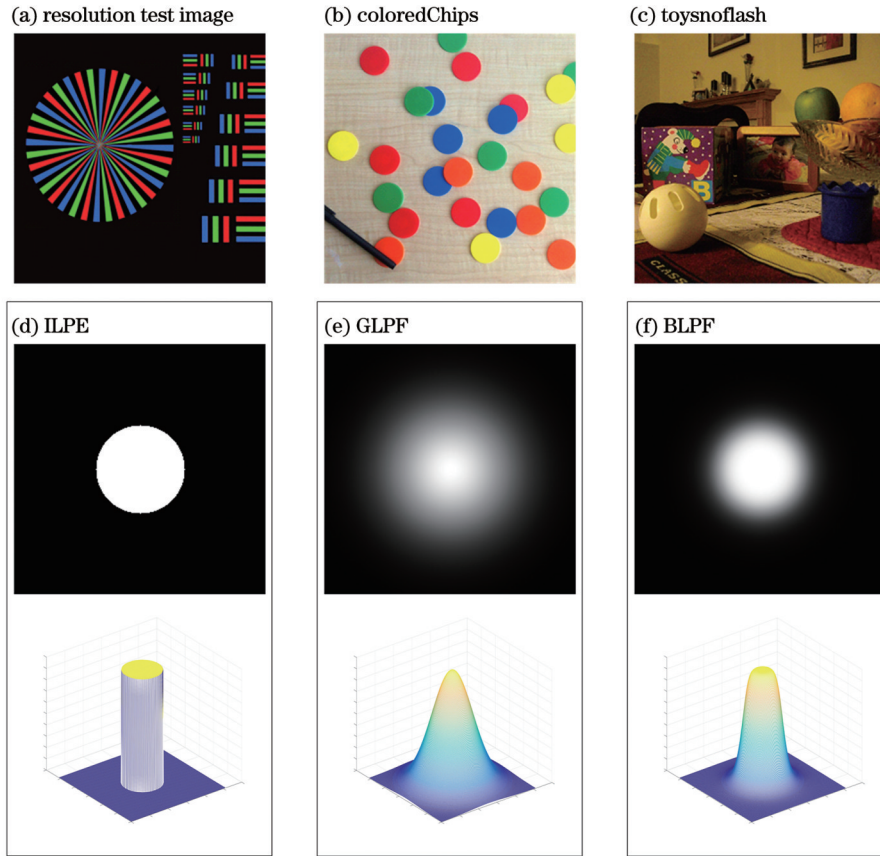


图2 目标物体原始图和三种滤波器模型。(a)~(c)目标物体原始图;(d)理想低通滤波器;(e)高斯低通滤波器;(f)巴特沃斯低通滤波器

Fig. 2 Original images of target objects and three filter models. (a)~(c) Original images; (d) ideal low-pass filter (ILPF); (e) Gaussian low-pass filter (GLPF); (f) Butterworth low-pass filter (BLPF)

(65536个) $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 的彩色照明图案。仿真过程如原理部分所述。在图像重建阶段,用余弦编码复用策略将混叠光谱图像从空间域转换到傅里叶频率域进行频谱重组,再利用频域滤波器分别提取各分量图像,最后将各分量图像融合成多光谱图像。频域滤波是一种全局性滤波,对高于或低于某一特定频率的灰度变化信息予以滤除,因此,滤波器参量组合的选取对图像复原质量影响较大。下面将选用三种经典的频域滤波器提取各光谱通道的图像信息,通过对比分析图像复原质量来获得最佳的滤波器参量组合。

三种低通滤波器的二维、三维空间模型如图2(d)~(f)所示。理想低通滤波器(ILPF)、高斯低通滤波器(GLPF)和巴特沃斯低通滤波器(BLPF)的定义分别为

$$B_{\text{ILPF}}(f_x, f_y) = \begin{cases} 1, & R(f_x, f_y) \leq R_0 \\ 0, & R(f_x, f_y) > R_0 \end{cases}, \quad (12)$$

$$B_{\text{GLPF}}(f_x, f_y) = \exp\left[\frac{-R^2(f_x, f_y)}{2 \cdot R_0^2}\right], \quad (13)$$

$$B_{\text{BLPF}}(f_x, f_y) = \frac{1}{1 + [R(f_x, f_y)/R_0]^{2n}}, \quad (14)$$

式中: $R(f_x, f_y)$ 为傅里叶频率域中的点 (f_x, f_y) 到原点的距离; R_0 为滤波半径,表示对物体频谱信息滤波时对应的截止频率; n 为巴特沃斯滤波器的阶数,表示对图像进行巴特沃斯滤波的次数。

为了定量评价复原图像的质量,利用峰值信噪比(PSNR)和结构相似性指数(SSIM)进行评估。其中,PSNR和SSIM值越高,表示图像复原质量越好。图3展示了图2(a)所示分辨率测试图像的仿真结果。图3(a)给出了三种滤波器在不同滤波半径下的多光谱图像复原结果,可以看出:滤波半径较小时,使用三种滤波器复原的图像都较为模糊;随着滤波半径增大,图像逐渐变清晰。对比三种滤波器的复原结果可以看出,使用理想滤波器重建的多光谱图像有较为明显的振铃效应,而高斯滤波器和巴特沃斯滤波器都能很好地提升复原图像的质量。图3(b)和3(c)展示了不同滤波器参量组合下PSNR和SSIM的变化趋势,可以发现两图的变化趋势基本一致,即:随着滤波半径逐渐增大,滤取的低频分量信息逐渐增加,图像复原质量逐渐达到一个极大值;随着滤波半径的进一步增加,受其他通道频谱信息的影响,图像光谱会产生串扰,复原图像质量降低。

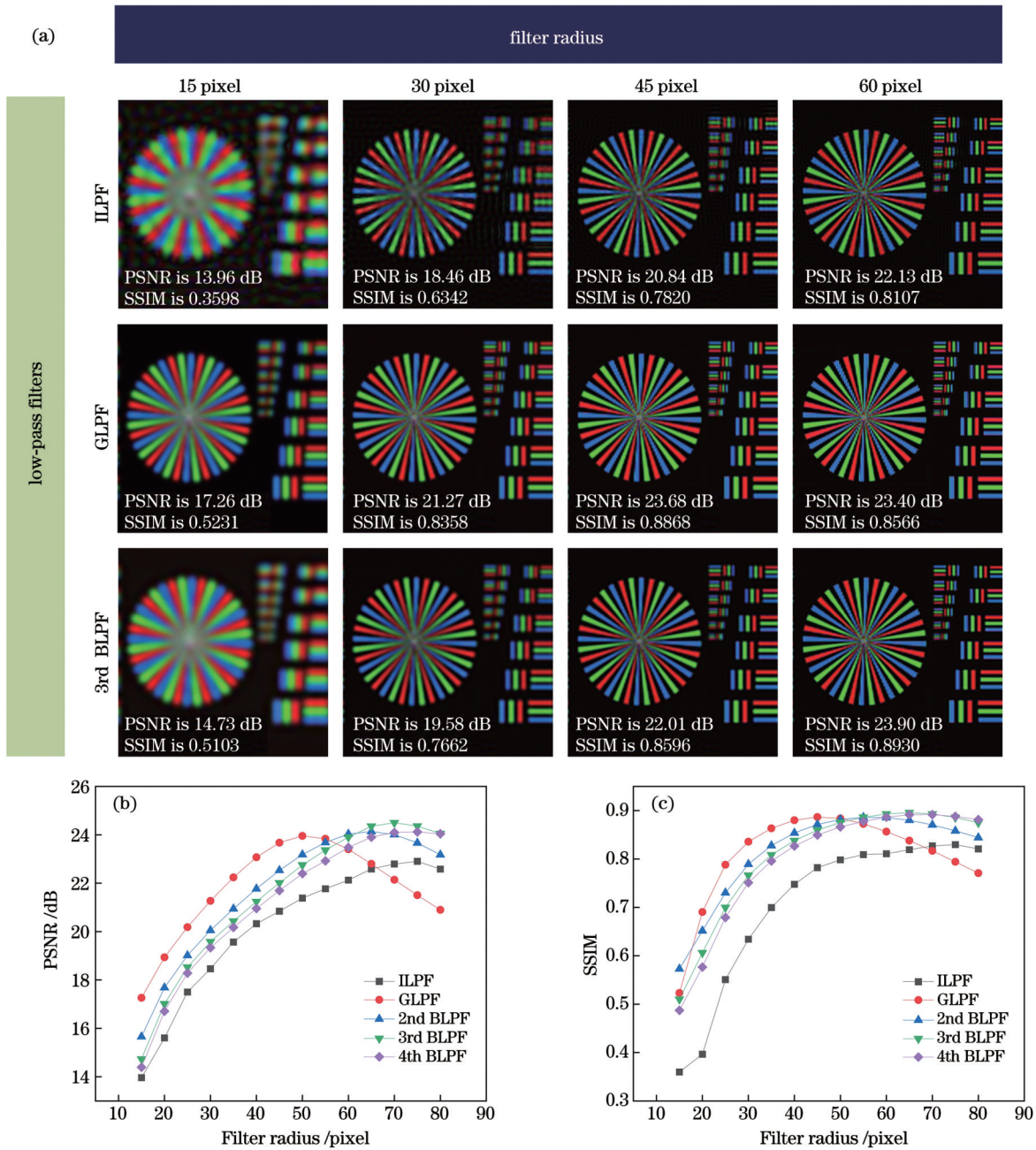


图 3 分辨率测试图像的仿真结果。(a)三种滤波器在不同滤波半径下的多光谱图像复原结果;(b)不同滤波器参量组合下复原图像的 PSNR 图;(c)不同滤波器参量组合下复原图像的 SSIM 图

Fig. 3 Simulation results of resolution test image. (a) Multispectral image restoration results of three filters under different filter radii; (b) PSNR chart of restored images under different filter parameters combinations; (c) SSIM chart of restored images under different filter parameters combinations

图 4 和图 5 分别展示了图 2(b)和图 2(c)所示目标图像的仿真结果,仿真结果与图 3 相似。可以发现:当滤波半径较小时,高斯滤波器对多光谱图像的复原效果优于巴特沃斯滤波器,巴特沃斯低阶滤波器的复原效果优于高阶滤波器;曲线拐点的出现时间和复原质量呈现一定的相关性,复原效果越好的滤波器对应的曲线拐点出现得越早;在达到极大值后,随着滤波半径的进一步增大,高斯滤波器和巴特沃斯滤波器复原图像出现了彩色马赛克条纹,图像的 PSNR 和 SSIM 值

急剧降低。整体来看,使用高斯滤波器和巴特沃斯滤波器都能较好地提取出目标的多光谱信息。考虑到使用高斯滤波器可以在较小的滤波半径下获得相同的复原效果,更大程度地避免了多颜色通道之间的信息串扰,笔者更倾向于使用高斯低通滤波器来提取各通道的频谱信息。

4 实验评估

对所提余弦编码复用多光谱关联成像技术的成

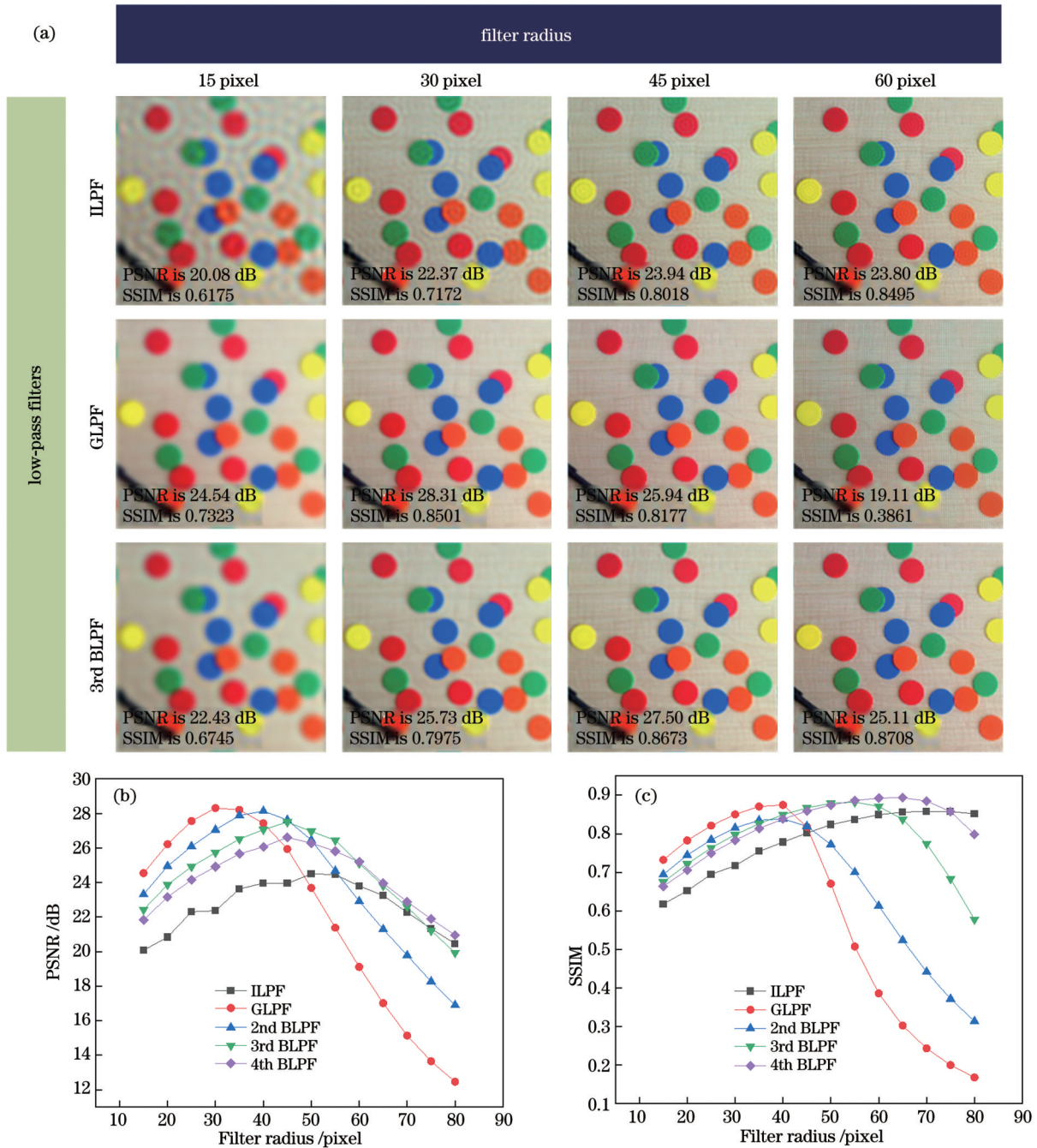


图 4 图像 coloredChips 的数值仿真结果。(a) 三种滤波器在不同滤波半径下的多光谱图像复原结果;(b) 不同滤波器参量组合下复原图像的 PSNR 图;(c) 不同滤波器参量组合下复原图像的 SSIM 图

Fig. 4 Simulation results of image coloredChips. (a) Multispectral image restoration results of three filters under different filter radii; (b) PSNR chart of restored images under different filter parameters combinations; (c) SSIM chart of restored images under different filter parameters combinations

像性能和滤波策略进行实验研究。实验系统如图 6 所示,主要由投影系统(数字投影仪 DLP)、成像物体(两个彩色玩偶)、光学接收系统(收束透镜和光电倍增管单像素探测器)和计算机系统(内置一个采集卡)组成。计算机程序生成一组(65536 个)分辨率为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 的彩色照明图案,该图案与数值仿真所用图案相同。综合考虑光电探测器的响应时间与测量信号的信噪比后,数字投影仪以

0.2 s 投影一个图案的频率照射物体。调制照明图案与成像物体发生作用后,后向散射光经光学透镜(透镜口径为 50.8 mm,焦距为 100 mm)会聚后被一个单像素探测器收集并转化成电信号,然后被采集卡(DAQ)采样并存储于计算机中,采样频率设为 40 kHz。透镜距离成像物体约 1000 mm,距离单像素探测器约 110 mm,以保证能收集全部成像物体的反射光并将其会聚于探测器靶面。复原过程与数值仿

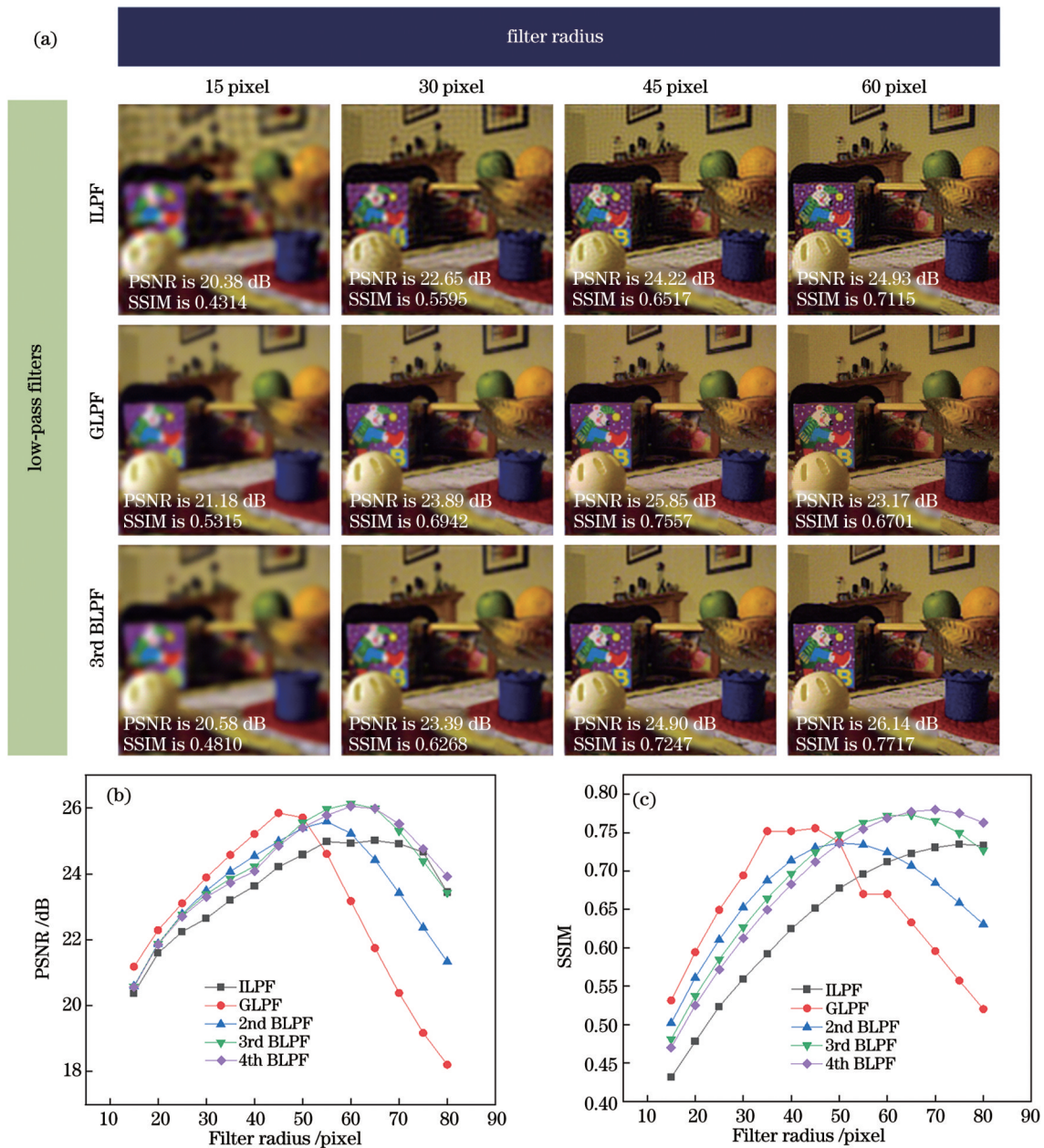


图 5 图像 toysnflash 的数值仿真结果。(a) 三种滤波器在不同滤波半径下的多光谱图像复原结果；(b) 不同滤波器参量组合下复原图像的 PSNR 图；(c) 不同滤波器参量组合下复原图像的 SSIM 图

Fig. 5 Simulation results of image toysnflash. (a) Multispectral image restoration results of three filters under different filter radii; (b) PSNR chart of restored images under different filter parameters combinations; (c) SSIM chart of restored images under different filter parameters combinations

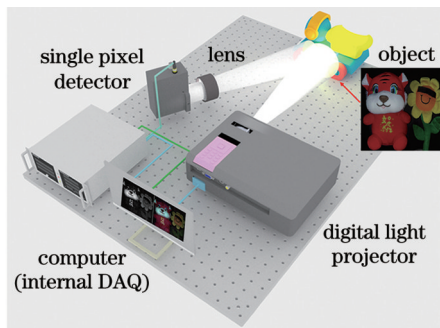


图 6 余弦编码复用多光谱关联成像系统结构图

Fig. 6 Structure diagram of cosinusoidal encoding multiplexed multispectral ghost imaging

真时所述相同。

不同滤波参量下的实验复原结果如图 7(a) 所示 (图像分辨率均为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$), 均较好地实现了对彩色物体的多光谱成像。对比可以发现, 高斯滤波器和巴特沃斯滤波器的复原结果优于理想滤波器。从老虎公仔胸前汉字“如虎添亿”的清晰度可以看出: 当滤波半径为 $15 \sim 45 \text{ pixel}$ 时, 高斯滤波器的效果略优于巴特沃斯滤波器; 当滤波半径达到 60 pixel 时, 受系统硬件和环境噪声影响出现的彩色马赛克条纹加重, 且整体颜色变暗, 复原图像质量下降。实验结果与仿真结果相似, 这初步表明可以使用高斯低通滤波器

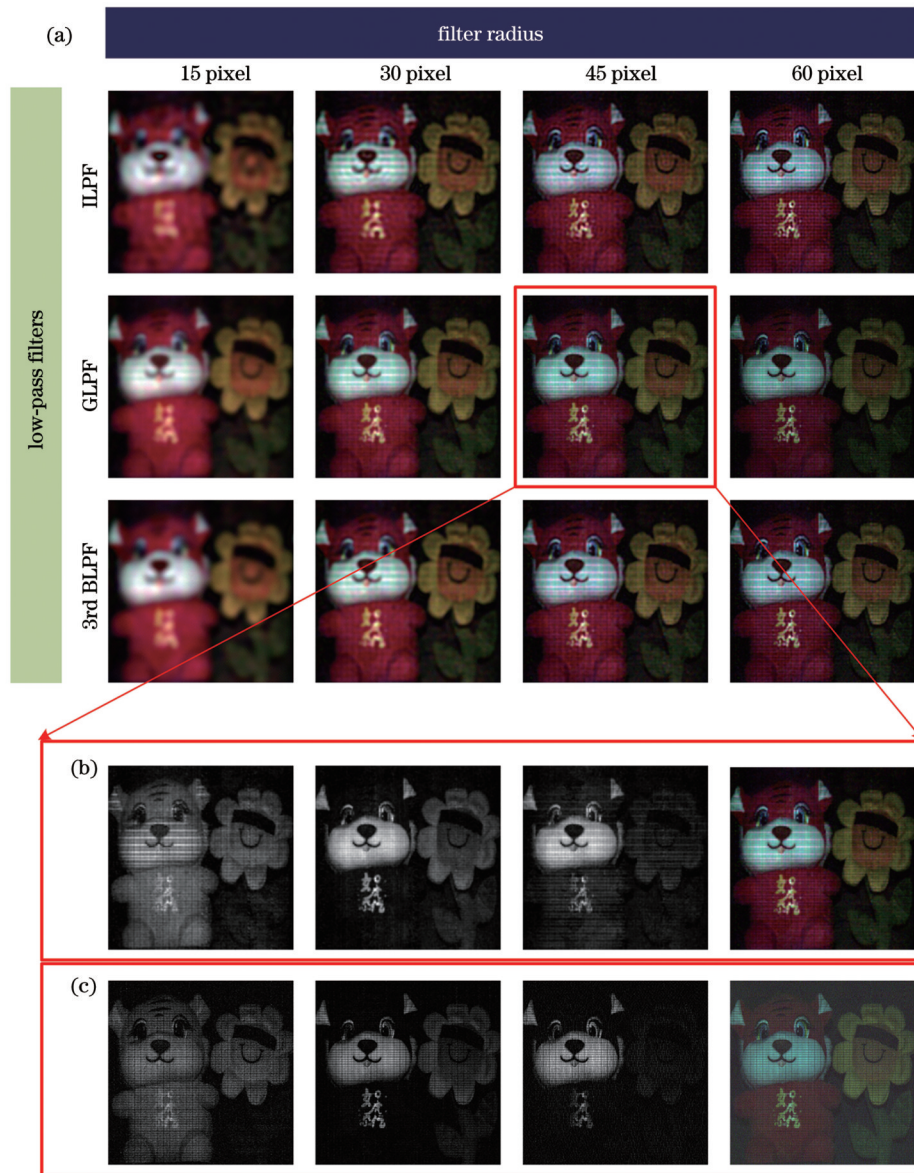


图 7 对比实验结果图,其中(b)和(c)中各图依次为红色、绿色、蓝色通道的光谱分量图像和最终重建出的多光谱图像。(a)不同滤波半径下的实验复原结果;(b)滤波半径为 45 pixel 的高斯低通滤波器的复原结果;(c)传统方法的成像结果。

Fig. 7 Results of contrast experiment, where spectral component images of red, green, blue channels and multispectral images are respectively shown in Figs. 7(b) and 7(c). (a) Restoration results under different filtering parameters; (b) restoration results of Gaussian low-pass filter with a filter radius of 45 pixel; (c) imaging results from conventional methods

在较小滤波半径下提取多通道频谱信息。图 7(b)展示了使用 45 pixel 滤波半径的高斯低通滤波器的复原结果。

为对比验证所提方法的实验成像结果,在不改变硬件系统参数的条件下,使用传统方法分三次分别投影红色、绿色和蓝色 Hadamard 图案对成像物体进行照明调制,使用单像素探测器收集物体反射信号并将其存储于计算机中,再采用线性叠加算法分别复原三个通道的光谱图像,最终融合成目标物体的多光谱图像。实验结果图展示在图 7(c)中。对比图 7(b)和图 7(c)可知,图 7(b)所示成像结果的信噪比和对比度优于图 7(c)。这可能是由于在图像重建时进行了合适的傅里叶滤波,减小了实际测量过程

中各种噪声的影响。整体来看,采用传统方法分三次投影的成像结果与所提余弦编码复用技术一次投影的成像结果相似,初步表明本技术可以高效地获取物体的多光谱信息。

5 结 论

本文介绍了一种余弦编码复用多光谱关联成像技术,该技术将 Hadamard 基图案与多个确定频率的余弦结构编码矩阵复用为彩色照明光,并采用该照明光对成像物体进行调制照明。编码矩阵对各通道独立编码,利用余弦结构编码的傅里叶频移特性可在频域中解码出不同通道的分量图像信息。该方法仅需一个单像素探测器即可同步获取多光谱图像,简化了多光谱

成像系统。相比于多光谱编码关联成像^[16-17],本方法在复原过程中不需要使用压缩感知优化算法,减少了图像重建的计算时间;相比于基于傅里叶单像素多光谱成像的策略^[22],所提方法简单灵活,可将光谱分量信息频移到傅里叶频域的任何区域,并且可以灵活地选取光谱通道数量。多光谱图像重建过程分为两个主要步骤:第一步是采用线性叠加算法恢复目标物体的混叠光谱图像;第二步是在频域中分别提取出各通道的光谱分量图像,然后将各光谱分量图像融合成多光谱图像。鉴于频域滤波器参数的选取会对图像重建结果产生较大影响,本文通过数值仿真对所提技术的滤波策略进行了研究,仿真结果表明:使用高斯低通滤波器能在较小的滤波半径下获得良好的复原效果,相比理想低通滤波器和巴特沃斯滤波器更具优势。将所提方法与传统方法的图像重建效果进行对比实验,验证了该方法的先进性和滤波策略的合理性。

理论上,本文所提余弦编码复用技术可以实现较多通道(大于 3 个)的多光谱成像;然而,随着光谱通道数增加,解码难度会增大,主要体现在如何从有限的频谱空间中更多数量的分量图像信息区分开。光谱通道数较多时,滤波半径的取值范围受限。如果选取范围太小,则复原质量降低;如果选取范围太大,提取的光谱分量图像频谱之间就会出现重叠串扰。因此,需要对通道数量和图像复原质量进行权衡。本文滤波策略也存在进一步优化的空间。由于不同目标场景的混叠光谱图像在频率域的稀疏性有所不同,为了获得预期的成像效果,需要对每个目标进行单独的参量优化,以找到合适的滤波半径。通过分析现有的仿真和实验数据可知,当使用高斯低通滤波器复原分辨率为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 的图像时,滤波半径在 $30 \sim 50 \text{ pixel}$ 范围内选取较为合适。针对不同的目标场景,滤波半径越大,复原图像的细节越清晰,但同时受其他光谱通道的干扰也会越大,可能会导致图像出现颜色混叠,因此需要在图像清晰度和色彩真实度之间进行权衡。在未来的工作中,笔者将考虑这些因素,以期重建出更高质量的多光谱图像。

参 考 文 献

- [1] Strelakov D V, Sergienko A V, Klyshko D N, et al. Observation of two-photon "ghost" interference and diffraction[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 74(18): 3600-3603.
- [2] Pittman T B, Shih Y H, Strelakov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. *Physical Review A*, 1995, 52(5): R3429-R3432.
- [3] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. Two-photon coincidence imaging with a classical source[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(11): 113601.
- [4] Valencia A, Scarcelli G, D' Angelo M, et al. Two-photon imaging with thermal light[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(6): 063601.
- [5] Shapiro J H. Computational ghost imaging[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.
- [6] Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053840.
- [7] 孙宝清, 王玉鹏. 时域鬼成像及其应用[J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1212001.
Sun B Q, Wang Y P. Temporal ghost imaging and its application[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1212001.
- [8] Stantchev R I, Sun B Q, Hornett S M, et al. Noninvasive, near-field terahertz imaging of hidden objects using a single-pixel detector[J]. *Science Advances*, 2016, 2(6): e1600190.
- [9] 闫昱琪, 赵成强, 徐文东, 等. 太赫兹主动关联成像技术研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0814001.
Yan Y Q, Zhao C Q, Xu W D, et al. Research on the terahertz active ghost imaging technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0814001.
- [10] Radwell N, Mitchell K J, Gibson G M, et al. Single-pixel infrared and visible microscope[J]. *Optica*, 2014, 1(5): 285-289.
- [11] Edgar M P, Gibson G M, Bowman R W, et al. Simultaneous real-time visible and infrared video with single-pixel detectors[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10669.
- [12] Yu H, Lu R, Han S, et al. Fourier-transform ghost imaging with hard X-rays[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(11): 113901.
- [13] Zhang A X, He Y H, Wu L A, et al. Table-top X-ray ghost imaging with ultra-low radiation[J]. *Optica*, 2018, 5(4): 374-377.
- [14] Welsh S S, Edgar M P, Bowman R, et al. Fast full-color computational imaging with single-pixel detectors[J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23068-23074.
- [15] Bian L H, Suo J L, Situ G H, et al. Multispectral imaging using a single bucket detector[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24752.
- [16] Huang J, Shi D F. Multispectral computational ghost imaging with multiplexed illumination[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(7): 075701.
- [17] Huang J, Shi D F, Meng W W, et al. Spectral encoded computational ghost imaging[J]. *Optics Communications*, 2020, 474: 126105.
- [18] 孙鸣捷, 闫崧明, 王思源. 鬼成像和单像素成像技术中的重建算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(2): 0200001.
Sun M J, Yan S M, Wang S Y. Reconstruction algorithms for ghost imaging and single-pixel imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(2): 0200001.
- [19] 陆明海, 沈夏, 韩申生. 基于数字微镜器件的压缩感知关联成像研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0711002.
Lu M H, Shen X, Han S S. Ghost imaging via compressive sampling based on digital micromirror device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0711002.
- [20] 高荣科, 严露沙, 徐陈祥, 等. 影响计算鬼成像质量的两种关键技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(18): 1811011.
Gao R K, Yan L S, Xu C X, et al. Two key technologies influencing on computational ghost imaging quality[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(18): 1811011.
- [21] 柯钧, 张临夏, 周群. 压缩感知在光学成像领域的应用[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111006.
Ke J, Zhang L X, Zhou Q. Applications of compressive sensing in optical imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111006.
- [22] Zhang Z B, Liu S J, Peng J Z, et al. Simultaneous spatial, spectral, and 3D compressive imaging via efficient Fourier single-pixel measurements[J]. *Optica*, 2018, 5(3): 315-319.

Cosinusoidal Encoding Multiplexed Multispectral Ghost Imaging

Sun Yusong^{1,2,3}, Huang Jian^{1,3*}, Shi Dongfeng^{1,2,3}, Yuan Ke'e^{1,2,3}, Hu Shunxing^{1,2,3},
Wang Yingjian^{1,2,3}

¹Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

³Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, Anhui, China

Abstract

Objective Multispectral ghost imaging is a perfect combination of spectral and ghost imaging. Compared to single-band ghost imaging, multispectral ghost imaging provides richer information, which may improve the accuracy and reliability of object recognition, material analysis, and medical diagnosis. Traditional multispectral ghost imaging is accomplished by employing multiple detectors or time-divided detection via filter wheeling to capture images of various spectral channels and combine them into a color image. These strategies have limitations, such as complex structures, and require a large amount of data. Alternatively, by encoding and decoding in the projection and recovery stages, respectively, multispectral multiplexed ghost imaging can obtain the multispectral information of objects in one projection cycle. However, there are still some problems in existing multispectral multiplexed ghost imaging, such as requiring a compressed sensing algorithm in the restoration phase, significantly increasing time consumption. In this study, we propose cosinusoidal encoding multiplexed multispectral ghost imaging, which can effectively improve the imaging efficiency of multispectral ghost imaging while ensuring high-quality imaging through a simple and flexible encoding strategy.

Methods The process of cosinusoidal encoding multiplexed multispectral ghost imaging is divided into three steps. First, Hadamard basis patterns and cosinusoidal encoding matrices are combined to generate colored illumination patterns. The second step is similar to traditional ghost imaging; the constructed colored patterns are used to illuminate the target object, and a single-pixel detector is used to collect the reflection signal of the object. Subsequently, the conventional linear algorithm was used to obtain a composite grayscale image. The third step involved reconstructing the multispectral image. During this phase, a composite grayscale image of the object is converted to Fourier space for recombining the information of each channel. Further, the spectral information of the different channels is acquired separately and combined to generate a multispectral image. The influence of the ideal, Gaussian, and Butterworth low-pass filters on the restoration quality of multispectral images was simulated, and the approach was compared with the traditional method.

Results and Discussions The effectiveness of the proposed approach was verified by the numerical simulations of colored objects. In the restoration phase, different filtering parameters were used to extract the reconstructed spectral component information, and the PSNR (peak signal to noise ratio) and SSIM (structural similarity) were used to evaluate the reconstructed image quality (Fig. 2). The simulation results of the resolution test image show that multispectral images reconstructed with an ideal low-pass filter exhibit a ringing phenomenon. In addition, the Gaussian low-pass filter and Butterworth low-pass filter can improve image quality. When the filter radius is small, the reconstructed image becomes blurred. With an increased filter radius, the quality of the reconstructed images improves and gradually reaches a maximum value. As the filter radius increases, the image restoration quality rapidly decreases owing to the influence of other spectral component information (Fig. 3). Simulations indicate that for the images of natural scenery with higher gray levels, the Gaussian low-pass filter has the best restoration performance for a small filter radius, followed by the Butterworth low-order filter, the Butterworth high-order filter, and then ideal filters. The inflection point of the image quality-change curve corresponding to the filter with a better restoration effect appears earlier (Fig. 4, Fig. 5). The simulation results show that the Gaussian low-pass filter has certain advantages over the ideal and Butterworth filters. Preliminary experimental results demonstrate that the proposed method can achieve better imaging results when a Gaussian filter with a smaller filter radius is used. Through comparative experiments with traditional methods, the effectiveness of the proposed method and rationality of the filtering strategy are verified.

Conclusions This paper demonstrates an approach for combining cosinusoidal encoding and multispectral ghost imaging. It can flexibly construct cosine coding matrices to meet specific needs and then combine them with the Hadamard basis patterns to project the imaging object with color illumination light. Each channel is encoded independently by the cosine coding matrices, and the information of the component images can be decoded in the frequency domain using the Fourier frequency shift in the cosine structure coding matrices. This approach requires only a single-pixel detector to obtain a multispectral image of the target object, simplifying the multispectral imaging system. Simultaneously, using the compressed sensing optimization algorithm is not required in the restoration process, which reduces the computational time of image reconstruction and improves the imaging efficiency. Numerical simulations and experimental results show that the new approach can effectively improve the efficiency of multispectral information acquisition and shorten the image reconstruction time. In frequency-domain filtering, the Gaussian low-pass filter is more advantageous than the ideal and Butterworth filters.

Key words imaging systems; ghost imaging; encoding multiplexed; multispectral imaging; low-pass filter