

多波长同时照明的菲涅耳域非相干叠层衍射成像

潘安 王东 史祎诗 姚保利 马臻 韩洋

Incoherent ptychography in Fresnel domain with simultaneous multi-wavelength illumination

Pan An Wang Dong Shi Yi-Shi Yao Bao-Li Ma Zhen Han Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 124201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.124201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.124201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

厚样品三维叠层衍射成像的实验研究

[Experimental study on three-dimensional ptychography for thick sample](#)

物理学报.2016, 65(1): 014204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014204>

基于背景最佳滤波尺度的红外图像复杂度评价准则

[An evaluation criterion of infrared image complexity based on background optimal filter scale](#)

物理学报.2015, 64(23): 234202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234202>

基于叠层衍射的数字水印算法研究

[Watermarking algorithm based on ptychographical imaging](#)

物理学报.2015, 64(23): 234201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234201>

可调谐相位板空域频域联合分析

[Combined analysis of tunable phase mask within spatial and frequency domain](#)

物理学报.2015, 64(22): 224207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224207>

用液芯柱透镜快速测量液相扩散系数-折射率空间分布瞬态测量法

[Rapid measurement of the diffusion coefficient of liquids using a liquid-core cylindrical lens:a method for analysing an instantaneous diffusive picture](#)

物理学报.2015, 64(11): 114205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114205>

多波长同时照明的菲涅耳域非相干叠层衍射成像

潘安¹⁾³⁾ 王东²⁾³⁾ 史祎诗³⁾⁴⁾ 姚保利^{1)†} 马臻¹⁾ 韩洋¹⁾³⁾

1)(中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

2)(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

3)(中国科学院大学, 北京 100049)

4)(中国科学院光电研究院, 北京 100094)

(2016年1月8日收到; 2016年2月26日收到修改稿)

传统的叠层衍射成像往往采用单波长照明, 即使使用多波长来提升恢复质量也是采用依次照明的方式, 同时对相干性要求很高. 非相干光照明一直被认为不利于衍射成像. 本文提出了一种多波长同时照明的非相干叠层衍射成像方案及相应的多路复用叠层衍射成像算法, 并通过仿真和实验验证了该方案的可行性. 相比于传统的相干叠层衍射成像方案, 该方案不仅能够很好地恢复物像, 同时也能恢复不同波长下分别对应的物体的光谱响应、复振幅探针和光谱比例, 从而获得更多的物体信息, 具有多通道和多光谱的优势. 同时, 通过彩色图像编码的方式, 能够实现物体的真彩色复原和图像质量的增强. 此外, 还证明了该算法具有很强的鲁棒性, 研究了最多可分辨波长的数量. 该研究结果为叠层衍射成像技术的信息多路复用及多光谱成像在更多领域的应用展现了可能性.

关键词: 非相干, 叠层衍射成像, 迭代算法, 多波长

PACS: 42.30.-d, 42.25.Fx, 42.30.Kq, 42.30.Rx

DOI: 10.7498/aps.65.124201

1 引言

在生物和材料科学等领域中, 传统的使用透镜的光学成像技术已经无法满足如今日益增长的高分辨率成像的需求. 这些成像技术的分辨率主要受限于透镜的数值孔径大小, 而大数值孔径的透镜是很难制造的^[1]. 因此, 叠层衍射成像术(Ptychography)作为一种新颖的无透镜的成像技术正受到越来越多的关注. 通过记录交叠的衍射图样信息, 产生大量的数据冗余, 利用鲁棒的迭代算法^[2-4]能够很好地恢复样品和照明探针的复振幅信息, 同时所恢复的相位具有很高的信噪比和对比度^[5]. 该技术已经被进一步应用于超分辨率显微成像^[6]、厚三维物体成像^[4,7]、光学图像加密^[8]、表面轮廓测量^[9]、活细胞成像等^[10,11]诸多领域. 如今, 在X射线照明下二维叠层衍射成像的分辨率甚至可达十纳米

左右^[12].

在过去, 和其他同类的相位恢复成像技术相同, 叠层衍射成像技术也需要假设照明光具有百分之百的相干性, 尽管实际中照明光达不到百分之百的相干性, 但也能在较高的相干度下获得不错的再现像^[13]. 但是对于额外增加的非相干光同时照明, 这种相干模式下的非相干的衍射图样叠加, 在实验中一直被认为是对叠层衍射成像有损害的^[14]. 但是近年来, 相干衍射成像领域提出了一系列采用部分相干光源照明的成像方案^[15-17]. 同时Thibault和Menzel^[18]也提出了一种混合态的叠层衍射成像方案, 完全从一个新的视角证明了可以采用冗余信息来恢复不同照明模式下对应的物体. 事实上, 在数字全息中也有类似的概念^[19,20]. 由于叠层衍射成像的特殊衍射图样记录机理, 实际上物体的每一像元被一系列的照明光照射多次, 尽管每一单独的衍射图样是非相干的叠加, 但是可以看作是多个

† 通信作者. E-mail: yaobl@opt.ac.cn

衍射图样间的干涉条件的改变, 信息内容实际上仍然记录在其中, 这能让非相干的衍射图样分解为一系列的相干图样, 因此非相干叠层衍射成像是可行的^[14,18].

以往我们采用三波段依次照明, 通过提升冗余信息量来进一步提升再现像质量^[21], 受之启发, 这里我们提出了一种新的成像方案, 即多波长同时照明的菲涅耳域非相干叠层衍射成像及相应的多路复用的叠层衍射成像算法, 并通过仿真和实验进一步验证. 一方面, 证实了Thibault和Menzel^[18]所提出的原理, 另一方面与该文献算法不同, 不仅可以恢复不同波段下对应的复振幅物体, 同时也能恢复不同波段的光谱比例和不同波段下对应的不同复振幅的照明探针. 该方案能够通过获得多波段同时照明下的衍射图样, 恢复不同波段下对应的物像, 即物体的光谱响应, 具有传统叠层衍射成像不具有的多通道和多光谱的优势. 同时通过彩色图像编码的方式, 实现物体的真彩色恢复和图像质量的增强. 此外, 还证明了该算法具有很好的抗噪性能, 并研究了最多可分辨波长的数量.

2 成像方案和算法原理

2.1 成像方案

成像方案如图1所示, 考虑到实验现有条件, 采用三束激光, 分别是波长为632.8 nm的红光He-

Ne激光器, 波长为532 nm的绿光半导体激光器和波长为473 nm的蓝光半导体激光器. 事实上, 根据NTSC制的彩色编码方式, 只需要三个波段的光谱信息就已经足够恢复真彩色图像了. 三束激光经过双反射镜将光线调整至水平出射后, 通过双宽带分光棱镜(BS)合束, 再经过空间滤波器(针孔滤波器)扩束, 复消色差透镜准直后打到探针上, 通过探针的光束透过物体后衍射至成像探测器上. 出于方便的目的, 实验中采用孔阑(正十边形)作为探针. 通过精密机械平移台实现探针固定步长的扫描, 实验中探针扫描 3×3 的阵列, 如图1右下角所示. 探针直径为3.0 mm, 每次移动距离为0.5 mm, 交叠率为83.3%, 探针距离样品 $d = 28$ mm, 样品衍射至成像探测器的距离 $D = 100$ mm. 实验中接收衍射图样所使用的成像探测器为面阵CCD (Cool snap EZ型), 单像素尺寸为 $6.45 \mu\text{m} \times 6.45 \mu\text{m}$, 像素数为 $1392 \text{ pixels} \times 1040 \text{ pixels}$.

2.2 算法原理

相位恢复通常采用空域和频域间来回迭代的方式进行. 对于叠层衍射成像而言, 空域的约束是在物体与照明光束近似相乘之后的出射光波生成过程中, 物体和照明光束保持不变, 同时物体为一实值物体. 而频域的约束为猜测出射波的光强应与成像探测器所接收的光强一致. 其中, 最有效的恢复算法便是ePIE^[2]算法. 与之相同, 仍然将所有的

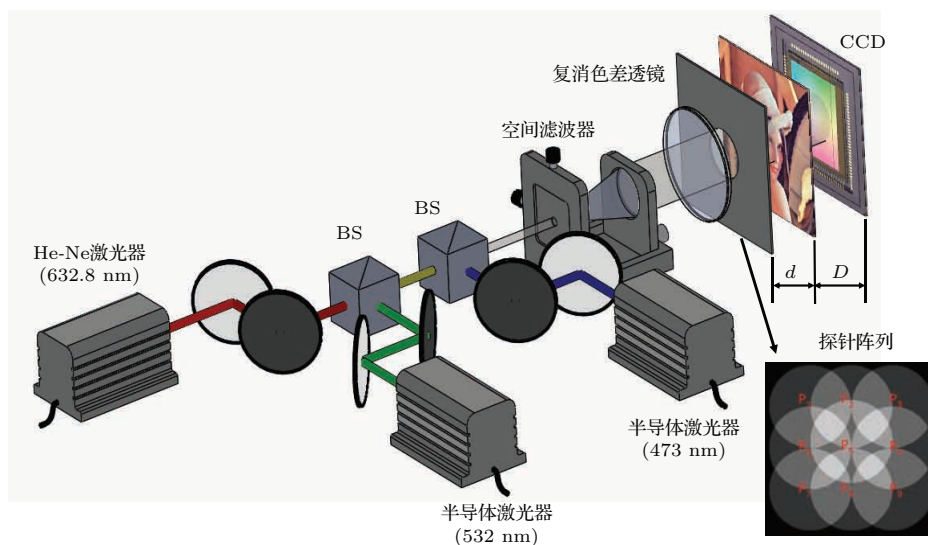


图1 (网刊彩色) 三波长同时照明的菲涅耳域非相干叠层衍射成像原理图

Fig. 1. (color online) Schematic of incoherent ptychography in Fresnel domain with tri-wavelength illumination.

衍射图样带入运算, 保留猜测出射波的相位, 更新振幅信息, 从而经过迭代恢复出复振幅物体和照明探针. 不同的是, 由于采用多波长光束同时照明, 而不同波长光束的光谱权重是未知的, 需要定义一个光谱比例来权重不同波段的光对照明探针和衍射图样的影响, 并将之更新出来. 当然, 不同波长光束的能量也可以通过某些手段提前测得. 另外, 在保留猜测出射波相位更新出射波振幅时, 约束条件变为每一波段出射波的光强总和应与成像探测器所接收的光强一致. 详细的算法步骤如下.

步骤 1 设物体为 $O_m(r)$, 探针为 $P_m(r)$, 其中 $r(x, y)$ 为物平面笛卡尔坐标系. 探针阵列扫描步长为 $R_c = (R_{x,c}, R_{y,c})$, $c = 1, 2, \dots, n$, 其中 c 为探针个数, m 为波长个数. 光谱权重为 $S_{c,m}$, 像平面笛卡尔坐标系为 $u(x, y)$. 同时分别随机猜测不同波长下对应的物体、探针和光谱权重. 一般都采用全 1 矩阵的猜测方式.

步骤 2 结合光谱权重计算多波长光束经过物体后分别对应的出射波

$$E_{c,m}(r) = \frac{\sqrt{S_{c,m}}}{\sqrt{\sum_{x,y} |P_m(r)|^2}} \cdot P_m(r) \cdot O_m(r). \quad (1)$$

步骤 3 做出射波衍射至像面

$$E_{c,m}(u) = ofrt[E_{c,m}(r)]. \quad (2)$$

步骤 4 保留出射波的相位, 更新出射波的振幅, 使猜测的衍射图样强度之和等于成像探测器所接收的强度值

$$E'_{c,m}(u) = \frac{\sqrt{I_c(u)} E_{c,m}(u)}{\sqrt{\sum_m |E_{c,m}(u)|^2}}. \quad (3)$$

步骤 5 做逆菲涅耳衍射至物面

$$E_{c,m}(r') = iofrt[E'_{c,m}(u)], \quad (4)$$

其中, $ofrt$ 和 $iofrt$ 分别定义为菲涅耳衍射变换和逆菲涅耳衍射变换;

步骤 6 分别更新不同波长下对应的物体和探针, 这里仍然采用 ePIE 算法 [2] 的更新式:

$$O_m(r) = O_m(r) + \alpha \frac{P_m^*(r)}{|P_m(r)|_{\max}^2} \cdot \Delta\phi, \quad (5)$$

$$P_m(r) = P_m(r) + \beta \frac{O_m^*(r)}{|O_m(r)|_{\max}^2} \cdot \Delta\phi, \quad (6)$$

式中 α, β 分别对应于算法的搜索步长, 一般令 α, β 均为 1, * 代表复共轭计算, 且

$$\Delta\phi = E_{c,m}(r') - E_{c,m}(r); \quad (7)$$

步骤 7 根据计算得到的探针更新不同波长对应的光谱权重

$$S_{c,m} = \sum_{x,y} |P_m(r)|^2. \quad (8)$$

重复步骤 2—7 直到所有记录的衍射图样都被使用完后, 视为完成了一次迭代. 算法流程图如图 2 所示. 经过一定次数的迭代后, 当相应的恢复的衍射图样与所记录的衍射图样的均方误差足够小时, 比方说达到 10^{-2} 数量级, 即认为该算法达到收敛. 均方误差的计算公式为

$$SSE = \frac{\sum_{c,u} \left| \sum_m |E_{c,m}(u)|^2 - I_c(u) \right|^2}{\sum_{c,u} I_c(u)}. \quad (9)$$

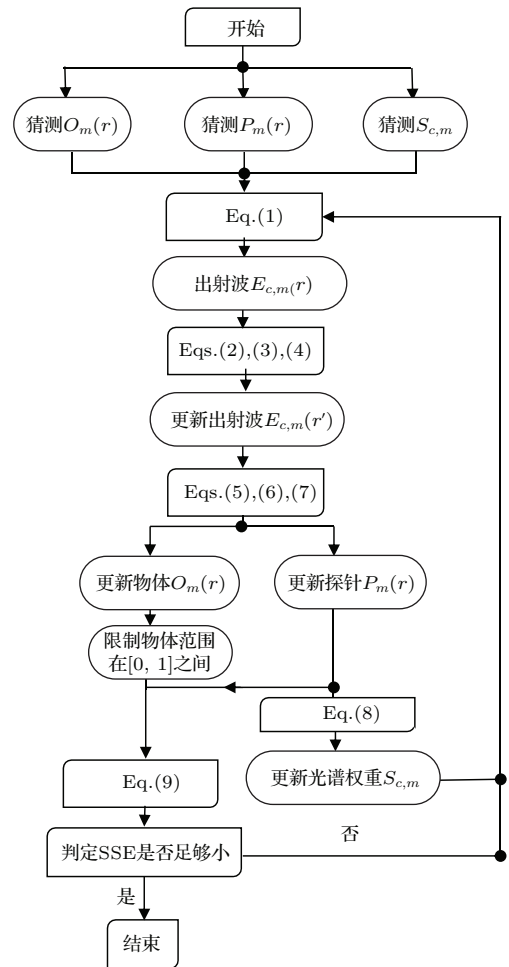


图 2 叠层衍射成像的多波长复用算法流程图
Fig. 2. Flow chart diagram of the proposed wavelength multiplexing algorithm for Ptychography.

提取所恢复的多波长光谱响应中的红、绿、蓝三波段信息, 进行彩色编码即可实现物体的真彩色恢复, 同时也可以提高成像质量. 这里采用 NTSC 制的编码方式, 相应的编码公式为

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.523 & 0.312 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (10)$$

实验中, 使用均方误差 MSE 评价复原的质量. MSE 值越小, 表示复原的质量越好. 计算两张图片 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$ 的均方误差计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{MSE} &= \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M [f(x, y) - g(x, y)]^2, \quad (11) \end{aligned}$$

其中, M, N 分别是 x, y 方向的像素个数.

3 实验结果与分析

首先通过实验验证该方案和算法的可行性及成像效果. 实验中使用图 3(a1) 所示的植物茎横切组织作为样品. 直观地将三束激光调整至约为等比例混合, 图 3(a2) 所示的为 CCD 接收的一个衍射图样, 它是由红绿蓝三波段分别对应的衍射图样非相干叠加而成, 分别如图 3(a3)—图 3(a5) 所示. 实际上, 图 3(a3)—图 3(a5) 是获得不到的, 这里通过遮挡其他两束光分别获得各波段对应的衍射图样, 目的是为了将他们与图 3(a2) 作对比, 可以看出由于非相干叠加, 三波段混合后的衍射图样没有各个波段对应的衍射图样清晰, 但是三波段各自所包含的信息仍然是在其中的.

通过使用提出的多路复用迭代算法, 迭代 300 次后恢复结果如图 4 所示, 其中图 4(a1)—图 4(a3) 分别为红绿蓝三波段恢复的振幅信息, 图 4(b1)—

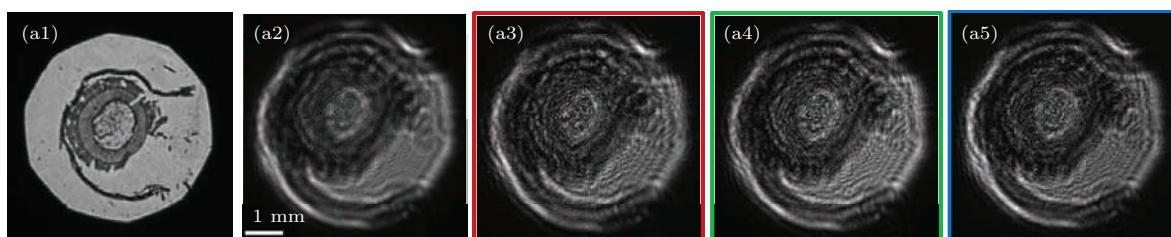


图 3 (网刊彩色) (a1) 植物茎横切组织样品; (a2) CCD 接收的非相干衍射图样; (a3) 红光对应的衍射图样; (a4) 绿光对应的衍射图样; (a5) 蓝光对应的衍射图样

Fig. 3. (color online) (a1) Samples of crosscut tissue of plant stem; (a2) a typical incoherent diffraction pattern; (a3) a diffraction pattern of red channel; (a4) a diffraction pattern of green channel; (a5) a diffraction pattern of blue channel.

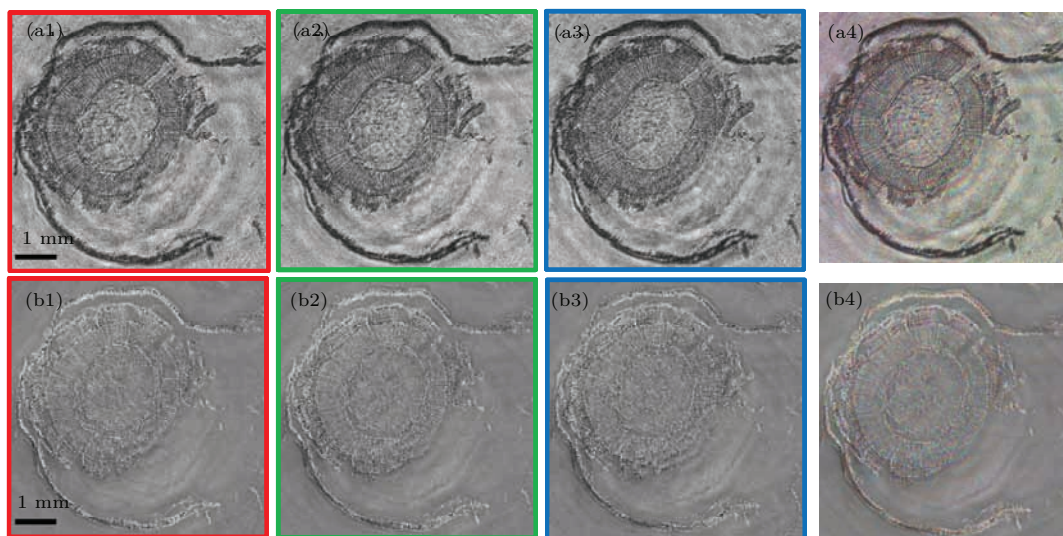


图 4 (网刊彩色) 实验恢复结果 (a1)—(a3) 分别为红绿蓝三波段恢复的振幅图像; (b1)—(b3) 分别为红绿蓝三波段恢复的相位图像; (a4) 彩色编码后的真彩色振幅图像; (b4) 彩色编码后的真彩色相位图像

Fig. 4. (color online) Reconstructions of experiments: (a1)—(a3) Amplitudes of the reconstruction via red channel, green channel and blue channel; (b1)—(b3) phases of the reconstruction via red channel, green channel and blue channel.

图4(b3)分别为红绿蓝三波段恢复的相位信息,图4(a4)和图4(b4)分别为经过彩色编码后的真彩色图样. 实验恢复的光谱比例为1:1.04:0.93,近似于等比例,与上述直观上设计的大致相同. 实际上红绿蓝三波段恢复结果为该物体对应的光谱响应,可以看出除中心细节略有不同外,该物体对红绿蓝三波段的光谱响应大体一致. 通过彩色编码获得的真彩色图像清晰度高于三波段对应的恢复结果,证明彩色编码确实能够提升图像的恢复质量. 从而不仅能够很好地恢复物体的真彩色复振幅图像,同时也能够获得不同波段下的光谱响应,这对进一步处理物体,如挖掘物体详细信息,辨别物体提供了更多的可能性.

实验中也同时恢复了各波段的复振幅探针,结果如图5所示,其中图5(a1)—图5(a3)为三波段恢复的振幅信息,而图5(b1)—图5(b3)为三波段恢复的相位信息. 可以看出各个探针并不相同,这是由于不同波长的光束经过探针后的照明光束并不相同,这也说明了该算法不仅能够恢复物体,同时也能够恢复出不同波段分别对应的复振幅探针.

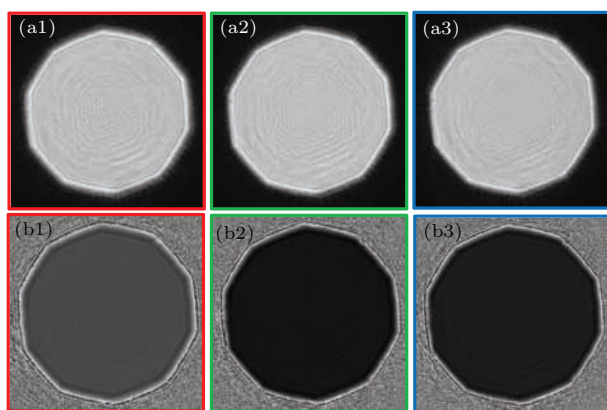


图5 (网刊彩色) 不同波段下恢复的复振幅探针 (a1)—(a3) 分别对应红绿蓝三波长恢复的探针的振幅; (b1)—(b3) 分别对应红绿蓝三波长恢复的探针的相位

Fig. 5. (color online) Recovered results of the probe complex amplitude: (a1)—(a3) Amplitudes of the reconstruction via red channel, green channel and blue channel; (b1)—(b3) phase of the reconstruction via red channel, green channel and blue channel.

4 仿真结果与分析

为了尽可能凸显该成像方案的优势,令样品对不同波段的光谱响应各不相同. 仿真中使用的真彩色物体振幅如图6(a1)所示,相位如图6(b1)所示,衍射面上有效采样点为128 pixels × 128 pixels,照明光束采用632.8, 532, 473 nm三种波长,三

波长完全等比例混合,光谱响应分别如图6(a2)—图6(a4),图6(b2)—图6(b4)所示,其中图6(a2)—图6(a4)为三波长对应的振幅信息,图6(b2)—图6(b4)为对应的相位信息. 探针扫描10 × 10的阵列,探针直径为40 pixels,交叠率为70%,探针紧贴物体放置,物体距CCD为50 mm. 仿真中一方面验证该算法的可行性及成像效果,另一方面测试了该算法的抗噪性能和最多可分辨的波长数量.



图6 (网刊彩色) 仿真中使用的真彩色物体及相应的光谱响应 (a1), (b1) 分别为真彩色物体的振幅和相位; (a2)—(a4) 分别各波长对应振幅; (b2)—(b4) 分别为各波长对应的相位

Fig. 6. (color online) The true color sample and spectral response of each wavelength in the simulation: (a1), (b1) denote the amplitude and phase of true color object, respectively; (a2)—(a4) amplitudes used for red channel, green channel and blue channel; (b2)—(b4) phases used for red channel, green channel and blue channel.

4.1 三波长同时照明的仿真结果

算法迭代300次后的恢复结果如图7所示,其中三波长恢复的光谱响应如图7(a2)—图7(a4),图7(b2)—图7(b4)所示,图7(a2)—图7(a4)分别为红绿蓝三波段光谱响应的振幅信息,图7(b2)—图7(b4)为三波段光谱响应的相位信息,通过彩色编码后得到图7(a1)所示的真彩色物体的振幅,图7(b1)所示的真彩色物体的相位.恢复结果的均方误差(MSE)如表1所示,可以看出均方误差都在 10^{-2} 数量级,与实验结果相一致,各波段恢复的光谱响应图像质量非常好.相位图像的质量明显好于

振幅图像,振幅图样会有些偏暗,这主要是由于算法中各波长的衍射强度之和为混合的衍射图样强度,而在数据处理中,对混合的衍射图样进行归一化处理,从而各波长的振幅都比较偏小,因而图像会偏暗一些.

表1 恢复结果的均方误差

Table 1. The MSE of recovered results.

均方误差	红通道	绿通道	蓝通道
振幅	0.0268	0.0105	0.0059
相位	0.0061	0.0054	0.0020



图7 (网刊彩色) 恢复结果 (a1), (b1) 分别为真彩色物体的振幅和相位; (a2)—(a4) 分别为各波长对应振幅; (b2)—(b4) 分别为各波长对应的相位

Fig. 7. (color online) Recovered results: (a1), (b1) denote the amplitude and phase of the recovered object, respectively; (a2)—(a4) amplitudes of the reconstruction via red channel, green channel and blue channel; (b2)—(b4) phases of the reconstruction via red channel, green channel and blue channel.

4.2 算法的鲁棒性

本文所提出的多路复用算法,其中主要的更新式为(5)式和(6)式,这与传统的ePIE算法的更新式是一样的.换言之,本文的算法与ePIE算法的核心是一致的,因而该算法在理论上也应该具有和ePIE算法一样的性质,比如较强的鲁棒性.因此保持其他条件不变,向衍射图样添加1%至10%的随机噪声,算法迭代300次收敛后各通道恢复结果的均方误差随随机噪声的变化如表2所示,结合表1可以看出,随着噪声比例的增加,MSE值逐渐增大,恢复质量是在逐渐下降的.在6%的随机噪声以内恢复的效果都令人满意,真彩色都无明显失

真,即使是在10%时,仍然有勉强可接受的恢复结果,如图8所示,尽管真彩色失真已经很明显了,但各通道MSE值仍然保持在 10^{-2} 数量级,说明该算法具有与ePIE算法相同的较强的鲁棒性.同时,注意到该算法对不同通道的鲁棒性也不同,这与物体本身的光谱吸收属性有关.

事实上,和传统叠层衍射成像一样,由于对数据采用了归一化的处理手段,使得即使是10%的随机噪声在数值上也并不明显;而另一方面,该方案所具有的独特多通道性使得噪声会被分摊至各波段通道,从而也降低了噪声对各通道的影响,故该算法甚至拥有强于ePIE算法的鲁棒性.

表2 恢复结果随添加噪声变化的均方误差

Table 2. The MSE of recovered results with various added noise.

添加均匀噪声比例	红通道		绿通道		蓝通道	
	振幅	相位	振幅	相位	振幅	相位
1%	0.0270	0.0071	0.0111	0.0076	0.0063	0.0020
2%	0.0275	0.0091	0.0115	0.0127	0.0066	0.0022
3%	0.0277	0.0091	0.0117	0.0157	0.0069	0.0025
4%	0.0300	0.0093	0.0122	0.0200	0.0071	0.0030
5%	0.0305	0.0099	0.0124	0.0221	0.0073	0.0036
6%	0.0315	0.0143	0.0124	0.0244	0.0077	0.0039
7%	0.0323	0.0154	0.0126	0.0300	0.0079	0.0046
8%	0.0324	0.0166	0.0126	0.0399	0.0081	0.0056
9%	0.0326	0.0224	0.0130	0.0425	0.0085	0.0056
10%	0.0329	0.0295	0.0140	0.0537	0.0088	0.0077



图8 (网刊彩色) 添加10%噪声后的恢复结果 (a1), (b1) 分别为真彩色物体的振幅和相位; (a2)—(a4) 分别各波长对应振幅; (b2)—(b4) 分别为各波长对应的相位

Fig. 8. (color online) Recovered results by adding 10% random noise: (a1), (b1) denote the amplitude and phase of the recovered object, respectively; (a2)—(a4) amplitudes of the reconstruction via red channel, green channel and blue channel; (b2)—(b4) phases of the reconstruction via red channel, green channel and blue channel.

4.3 算法最多可分辨波长数量

反复地使用如图9所示的三种细胞作为各个波长分别对应的光谱响应, 图9(a1)—图9(a3)分别对应于振幅, 图9(b1)—图9(b3)分别对应于相位, 波长范围从630—410 nm, 并以20 nm的差值递减, 共计12个波段. 分别对比5 × 5探针阵列和10 × 10探针阵列条件下的最多可恢复波长数量的

情况.

在5 × 5的探针下, 经过反复测试, 在该条件下算法最多可分辨8个波长. 算法迭代300次后的恢复结果如图10所示, 图10(a1)—图10(a8)分别为各波段恢复的振幅信息, 图10(b1)—图10(b8)分别为各波段恢复的相位信息. 一部分的图像仍然可以辨认, 部分图像有所模糊, 该恢复结果已经达到了5 × 5探针阵列下冗余量可恢复波段数的极限.

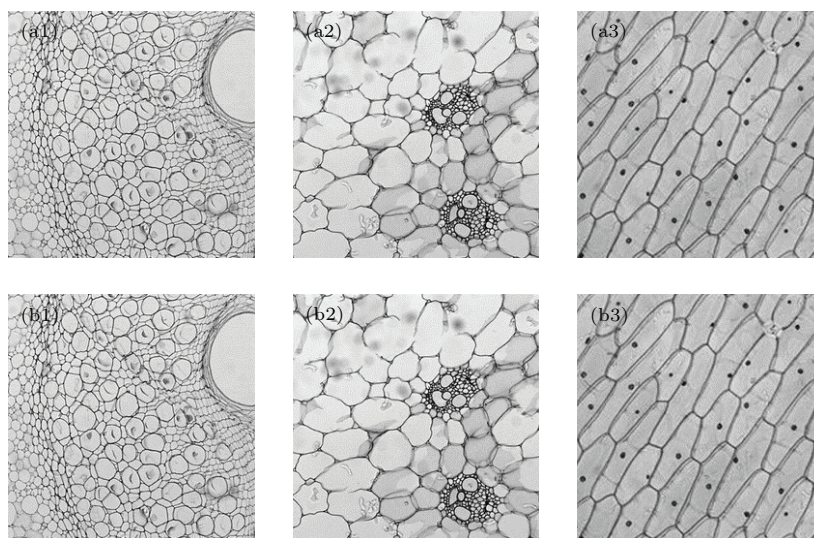


图9 仿真中使用的物体对应的光谱响应 (a1)—(a3) 为相应的振幅; (b1)—(b3) 为相应的相位

Fig. 9. The spectral response of samples used in the simulation: (a1)—(a3) Denote the amplitudes; (b1)—(b3) denote the phases.

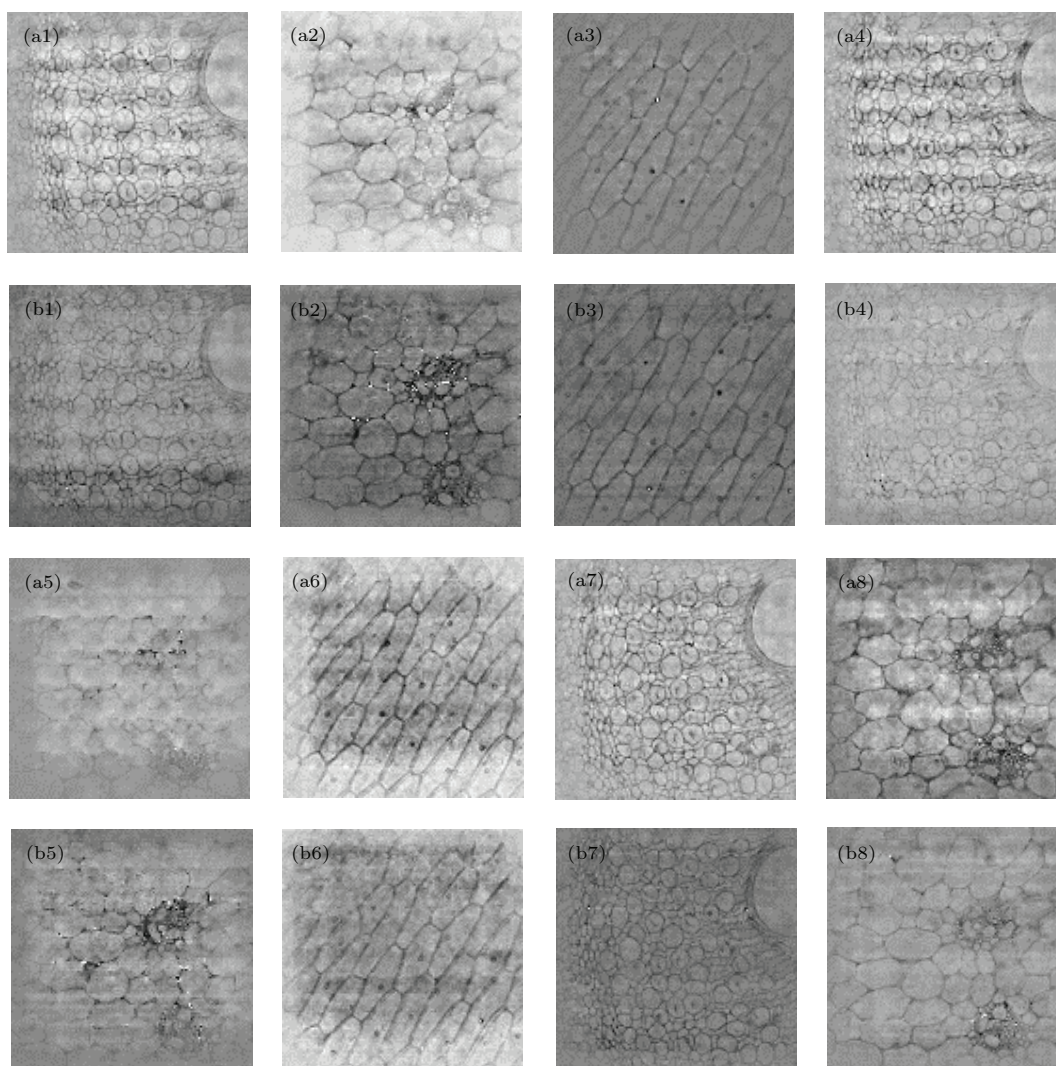


图10 5×5 探针下最多可分辨8个波长的恢复结果 (a1)—(a8) 分别为各波长对应振幅; (b1)—(b8) 分别为各波长对应的相位

Fig. 10. Recovered results of 8 wavelengths under the 5×5 array of probes: (a1)—(a8) amplitudes of the reconstruction; (b1)—(b8) phases of the reconstruction.

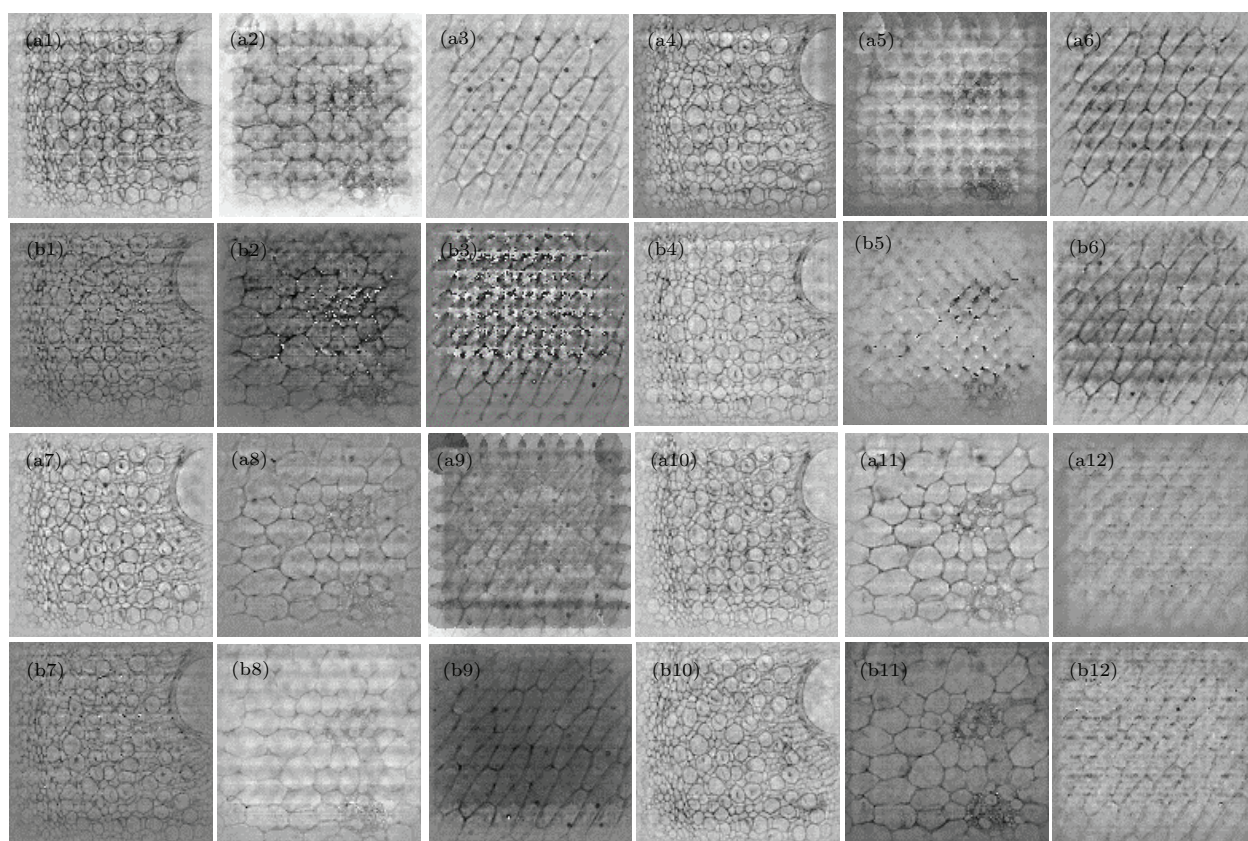


图 11 10×10 探针下最多可分辨 12 个波长的恢复结果 (a1)—(a12) 分别各波长对应振幅; (b1)—(b12) 分别为各波长对应的相位
Fig. 11. Recovered results of 12 wavelengths under the 10×10 array of probes: (a1)—(a12) amplitudes of the reconstruction; (b1)—(b12) phases of the reconstruction.

经过反复测试该算法在 10×10 探针阵列下最多可分辨 12 个波长. 算法迭代 300 次后的恢复结果如图 11 所示, 图 11 (a1)—图 11 (a12) 分别为各波段恢复的振幅信息, 图 11 (b1)—图 11 (b12) 为各波段恢复的相位信息. 可以看出, 有些图像仍然是可以辨认的, 有些图像已经模糊不清了, 该恢复结果已经达到了该信息冗余量可恢复波段数的极限. 通过将图 10 与图 11 相对比, 可以看出该算法能够分辨的波长数量与信息冗余量的大小有关. 因此, 要想获得更多波段的光谱响应, 只有优化探针结构, 提升探针阵列个数, 从而提高信息冗余量.

5 结 论

本文通过实验和仿真验证了多波长同时照明非相干叠层衍射成像方案的可行性. 证明了该方案具有多通道和多光谱的优势. 同时, 通过彩色图像编码的方式, 能够实现物体的真彩色复原和图像质量的增强, 这些是传统的叠层衍射成像所不具备的. 此外, 还研究了所提出的多路复用算法的鲁棒

性, 通过添加随机噪声进行测试, 证明了该算法具有很强的鲁棒性. 研究了该算法在该特定条件下最多可分辨波长的数量. 结果发现最多可分辨波长数量与数据的冗余量大小有关, 在 5×5 的探针阵列下, 最多可恢复 8 个波段分别对应的光谱响应, 而在 10×10 的探针阵列下, 最多可恢复 12 个波段分别对应的光谱响应. 要想进一步恢复更多的波段, 需要对探针阵列进行优化, 提升数据冗余量大小. 该研究结果为叠层衍射成像技术在可见光域、电子波段、X 射线等领域展现了更多的可能性.

参考文献

- [1] Rodenburg J M 2008 *Adv. Imag. Electron Phys.* **150** 87
- [2] Maiden A M, Rodenburg J M 2009 *Ultramicroscopy* **109** 1256
- [3] Fu J, Li P 2013 *Chin. Phys. B* **22** 014204
- [4] Maiden A M, Humphry M J, Rodenburg J M 2012 *J. Opt. Soc. Am. A* **29** 1606
- [5] Pan X C, Veetil S P, Liu C, Lin Q, Zhu J Q 2013 *Chin. Opt. Lett.* **11** 021103
- [6] Maiden A M, Humphry M J, Zhang F C, Rodenburg J M 2011 *J. Opt. Soc. Am. A* **28** 604

- [7] Pan A, Zhang X F, Wang B, Zhao Q, Shi Y S 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 014204 (in Chinese) [潘安, 张晓菲, 王彬, 赵青, 史祎诗 2016 物理学报 **65** 014204]
- [8] Shi Y, Li T, Wang Y, Gao Q, Zhang S, Li H 2013 *Opt. Lett.* **38** 1425
- [9] Claus D, Robinson D J, Chetwynd D G, Shuo Y, Pike W T, José J D J, Rodenburg J M 2013 *J. Opt.* **15** 035702
- [10] Marrison J, Rätty L, Marriott P, O' Toole P 2013 *Sci. Rep.* **3** 2369
- [11] Claus D, Maiden A M, Zhang F C, Sweeney F G R, Humphry M J, Schluesener H, Rodenburg J M 2012 *Opt. Express* **20** 9911
- [12] Thibault O, Dierolf M, Menzel A, Bunk O, David C, Pfeiffer F 2008 *Science* **321** 379
- [13] Pan X C, Lin Q, Liu C, Zhu J Q 2012 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **42** 889 (in Chinese) [潘兴臣, 林强, 刘诚, 朱健强 2012 中国科学: 物理学 力学 天文学 **42** 889]
- [14] Dong S Y, Shiradkar R, Nanda P, Zheng G A 2014 *Biomed. Opt. Express* **5** 1757
- [15] Wolf E 1982 *J. Opt. Soc. Am.* **72** 343
- [16] Whitehead L W, Williams G J, Quiney H M, Vine D J, Dilanian R A, Flewett S, Nugent K A, Peele A G, Balaur E, McNulty I 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 243902
- [17] Abbey B, Whitehead L W, Quiney H M, Vine D J, Cadenazzi G A, Henderson C A, Nugent K A, Balaur E, Putkunz C T, Peele A G, Williams G J, McNulty I 2011 *Nat. Photonics* **5** 420
- [18] Thibault P, Menzel A 2013 *Nature* **494** 68
- [19] Colomb T, Dahlgren P, Beghuin D, Cuche E, Marquet P, Depeursinge C 2002 *Appl. Opt.* **41** 27
- [20] Kühn J, Colomb T, Montfort F, Charrière F, Emery Y, Cuche E, Marquet P, Depeursinge C 2007 *Opt. Express* **15** 7231
- [21] Wang D, Ma Y J, Liu Q, Shi Y S 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 084203 (in Chinese) [王东, 马迎军, 刘泉, 史祎诗 2015 物理学报 **64** 084203]

Incoherent ptychography in Fresnel domain with simultaneous multi-wavelength illumination

Pan An¹⁾³⁾ Wang Dong²⁾³⁾ Shi Yi-Shi³⁾⁴⁾ Yao Bao-Li^{1)†} Ma Zhen¹⁾ Han Yang¹⁾³⁾

1) (*State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

2) (*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

4) (*Academy of Optoelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*)

(Received 8 January 2016; revised manuscript received 26 February 2016)

Abstract

Single wavelength illumination is used in the traditional ptychography. Even though using multi-wavelength to improve image quality, it takes the scheme of illuminating in turn due to the requirement of coherence. So far, the addition of incoherent modes has been regarded as a nuisance in diffractive imaging. Here we propose a scheme of incoherent ptychography and an algorithm of information multiplexing that uses the multi-wavelength illumination simultaneously, which are demonstrated in experiment and simulation. Compared with the scheme of traditional ptychography, it can recover not only the object well, but also the spectral response of the object, probes of complex value and spectral weight of each wavelength respectively. This method obtains much information about the object and owns the multichannel and multispectral merits. Meanwhile, by means of color image coding, this method can retrieve true color images and enhance the image quality. The proposed algorithm has strong robustness. Besides, we also investigate how many modes can be recovered by this method. The work may open up possibilities for information multiplexing in ptychography and multispectral microscopy imaging over various applications.

Keywords: incoherent, ptychography, iterative engine, multi-wavelength

PACS: 42.30.-d, 42.25.Fx, 42.30.Kq, 42.30.Rx

DOI: [10.7498/aps.65.124201](https://doi.org/10.7498/aps.65.124201)

† Corresponding author. E-mail: yaobl@opt.ac.cn