

大视场高分辨率数字全息成像技术综述

张文辉,曹良才*,金国藩

(清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室,北京 100084)

摘要: 数字全息作为一种干涉成像方式,能够准确记录物体的相位信息,具有快速、无损、三维成像等优势,被广泛应用于生物成像与材料科学等领域。与其他光学成像方式相同,数字全息也面临分辨率与成像视场互为限制而导致空间带宽积受限的问题。研究人员提出了计算照明、计算调制与计算探测等方法,通过牺牲成像系统的时间、偏振等自由度来扩展其空间带宽积。文中分析了光学系统信息承载能力的理论基础,总结了近年来大视场高分辨率的数字全息成像技术,介绍了倾斜照明、结构光照明、随机调制照明、多位置综合孔径探测和像素超分辨等方法实现分辨率增强,以及基于角度复用的视场扩展的原理及具体实现,对不同方法进行了比较和分析,并对提高分辨率以及扩大视场的途径进行了展望。

关键词: 数字全息; 超分辨/高分辨; 视场扩展

中图分类号: O438.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0603008

Review on high resolution and large field of view digital holography

Zhang Wenhui, Cao Liangcai*, Jin Guofan

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As an interference imaging method, digital holography (DH) can accurately record the phase information of objects, and has the advantages of fast, non-destructive and three-dimensional imaging. It is widely used in the field of biological imaging and materials science. Like other optical imaging methods, DH also faces the problem that the resolution and the field of view (FOV) are mutually constrained, resulting in limited space-bandwidth product (SBP). To solve this problem, researchers proposed methods such as computational illumination, computational modulation, and computational probing to extend SBP by sacrificing other degrees of freedom (such as time and polarization) of the imaging system. This paper firstly reviews the theoretical analysis of information capacity of an optical system. On this basis, we systematically summarize the high-resolution and large-FOV digital holographic imaging technology in recent years, introduce the principle and implementation of oblique illumination, structured illumination, random modulation illumination, multi-position synthetic aperture and pixel super-resolution method for resolution enhancement, and angle multiplexing method for FOV

收稿日期:2019-03-13; 修订日期:2019-06-21

基金项目:国家重点研发计划(2018YFF0212302)

作者简介:张文辉(1993-),男,博士生,主要从事数字全息方面的研究。Email: zhang-wh16@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介:金国藩(1929-),男,教授,博士生导师,主要从事信息光学领域方面的研究。Email: jgf-dpi@tsinghua.edu.cn

曹良才(1977-),男,副教授,博士生导师,博士,主要从事光学全息技术方面的研究。Email: clc@mail.tsinghua.edu.cn

extension, and make a comparative study. The potential ways to improve resolution and expand FOV are also prospected.

Key words: digital holography; super resolution/high resolution; field of view expansion

0 引言

大视场高分辨率一直都是光学成像技术追求的目标,尤其是随着生命科学以及材料科学向着微纳尺度成像的发展,高分辨率成像的重要性变得尤为凸出。数字全息(digital holography, DH)作为一种干涉成像方法,可以对生物组织、细胞等透明物体实现无标记定量相位成像,因为其不需要对细胞进行染色等操作,可以长时间无损地观测细胞的生命活动^[1-5]。在检测微纳器件的表面形貌等方面,数字全息因其具有相位成像的优势,可以精确地根据相位信息恢复器件的表面形貌^[6-8]。但是数字全息也面临分辨率与视场互相制约而导致空间带宽积受限的问题。同时,数字探测器件有限的靶面尺寸与像元尺寸也在一定程度上限制了成像的空间带宽积(space-bandwidth product, SBP)。

为了突破数字全息中成像系统空间带宽积的限制,尤其是系统数值孔径(numerical aperture, NA)对成像分辨率的限制,研究人员提出了计算照明、计算调制与计算探测等诸多方法,其中计算照明包括倾斜照明^[2, 6, 9-26]、结构光照明^[27-36]与随机调制照明^[37-38]等;计算调制包括光栅调制^[36, 39-43]、稀疏粒子随机运动调制^[44]等;计算探测包括亚像素平移探测^[45-49]、多位置综合孔径探测^[50-56]等。此处的“计算”,是指最终的大空间带宽积图像需要根据数据采集系统的物理结构参数,编程计算得到,而不是传统的“所见即所得”。

文中系统地梳理与总结了大视场高分辨率数字全息成像技术的研究进展,从成像系统的信息承载能力理论分析出发,解释了各种方法实现分辨率增强或视场扩展等空间带宽积扩展的原理,并对大视场高分辨率的数字全息技术发展趋势进行了展望。

1 空间带宽积扩展理论基础

1.1 成像分辨率限制与超分辨

空间带宽积作为描述光学系统的一个重要参数,指的是全部可分辨的像素数,代表了成像系统

能够通过的信息容量,可以用视场范围与最小可分辨特征尺寸(分辨率)计算得到^[57]。视场越大,可分辨最小特征越小,则空间带宽积越大。受到系统数值孔径的限制,相干成像系统的横向分辨率不超过 $\delta = 0.82\lambda/NA$, 其中 λ 是照明波长^[2]。数值孔径($NA = n\sin\alpha$, n 为折射率, α 为可被系统收集的最大衍射角)代表了系统的频谱信息收集能力,可收集的频谱信息越多,则可实现的分辨率越高。一般来说,透镜系统的数值孔径受限于所用物镜的数值孔径;而无透镜系统的数值孔径则受限于探测器的靶面尺寸与探测器-物体间距离的比值(S/L),如图 1(a)、(b)所示。

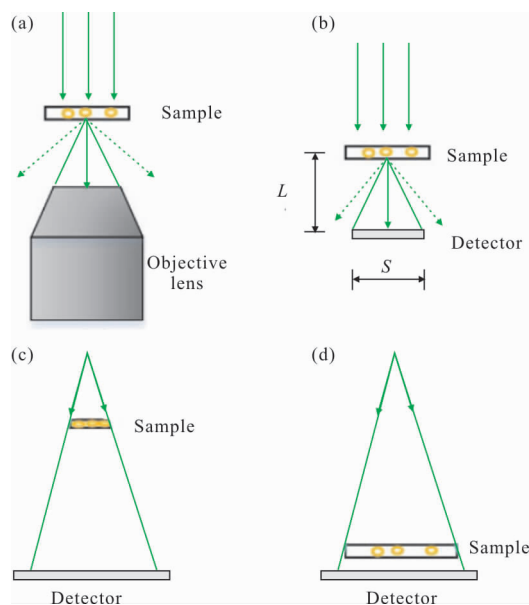


图 1 (a)透镜系统的数值孔径受限于物镜的数值孔径;(b)无透镜系统的数值孔径受限于探测器的靶面尺寸与探测器-物体间距离的比值 S/L ;(c)物体远离探测器时,系统分辨率受限于数值孔径;(d)物体紧挨探测器时,系统分辨率受限于像素尺寸

Fig.1 (a) NA of the lens-based system is limited by the NA of the objective lens; (b) NA of the lensless system is limited by the ratio of the detector size to the distance between the detector and the object S/L ; (c) resolution is limited by NA when the object is far from the detector; (d) resolution is limited by the pixel size when the object is close to the detector

考虑到数字探测器对信号的离散采样, 数字全息成像系统的分辨率可由下式表示:

$$\delta = \max \left\{ 0.82 \frac{\lambda}{NA}, \frac{\Delta}{M} \right\} \quad (1)$$

式中: \max 为取二者中的较大值; Δ 为采样间隔, 也即数字探测器的像素大小; M 为光学系统的放大倍率。一般来说, 基于物镜的数字全息成像系统的分辨率受限于所用物镜的数值孔径。无透镜系统的成像分辨率则视情况而定, 如果物体离探测器足够远导致数值孔径较小, 则受限于数值孔径; 如果物体离探测器较近而使得放大倍率较小, 近似为 1 (球面波照明下的几何放大), 则受限于探测器件的采样间隔, 如图 1(c)、(d) 所示。

为了实现超分辨率成像, 根据公式(1)可知, 在不同情况下, 可以从以下方面入手: (1) 使用较短波长光源照明; (2) 增大系统成像孔径; (3) 减小采样间隔; (4) 增大放大倍率。文中所指的“超分辨”是指突破系统自身原有的分辨率限制, 而不是物理上的阿贝衍射极限。

大部分的超分辨技术, 都是以增大系统的数值孔径为手段来提高成像分辨率。系统数值孔径越大, 能收集到的空间频谱信息越多, 在可解析的前提下, 空间可分辨最小尺寸越小。近年来发展迅速的无透镜片上全息技术 (Lensless on-Chip Holography, LOCH) 则是通过减小采样间隔来实现超分辨。因为在无透镜片上全息中, 物体与数字探测器的距离只有几百个微米, 等效的数值孔径约为 $NA=1$, 此时放大倍率 $M=1$, 而采样间隔通常在微米量级, 大多数的高频成分不能被解析, 即使是高数值孔径也不会带来高的分辨率。因此, 采用亚像素平移技术缩小等效采样间隔, 扩大可解析频率成分范围, 能够实现超分辨成像^[45-49]。

1.2 成像系统的自由度

分辨率只是描述成像系统的一个参数, 分辨率的提升必然是以某些性能指标的牺牲为代价的, 早在 1955 年, Fellgett 和 Linfoot 就推导出了二维光学成像系统的信息承载能力^[58], 在相干照明情况下:

$$N = 2L_x B_x 2L_y B_y \log \left(\frac{s+n}{n} \right) \quad (2)$$

式中: N 为光学系统的自由度; (B_x, B_y) 为 x 和 y 方向上的空间带宽; $L_x L_y$ 为视场; s 为信号的平均功率; n

为噪声功率。因为公式(2)没有考虑系统的时间带宽, 因此是不完整的。在 1966 年, Lukosz 提出了光学成像系统的自由度不变理论来解释超分辨技术^[59]:

$$N = 2(1+L_x B_x)(1+L_y B_y)(1+TB_T) \quad (3)$$

式中: T 为观测时间; B_T 为时间带宽。常数 2 代表两个相互正交的偏振态。Lukosz 指出, 如果知道物体的某些先验知识, 任何指标都可以扩展超过其系统限制, 通过按比例地降低其他指标, 以保证 N 不变, 比如牺牲视场提高分辨率。该理论没有考虑噪声的影响, 因为理论上如果没有噪声, 则可以通过解析延拓实现无限精细的成像分辨率^[60], 所以该理论还需要完善。Cox 和 Sheppard 在此基础上考虑了噪声的影响, 并扩展至三维成像情形, 给出了系统自由度的表达式^[61]:

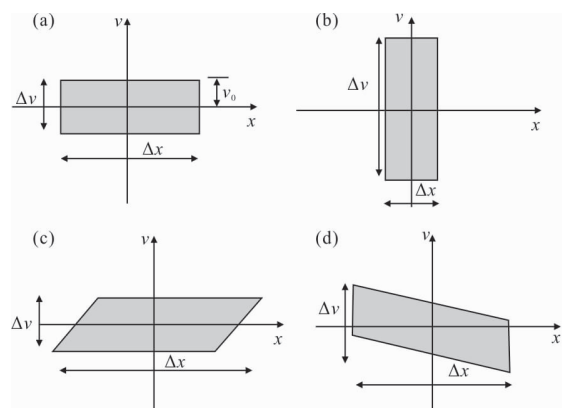
$$N = (1+2L_x B_x)(1+2L_y B_y) \times (1+2L_z B_z)(1+2TB_T) \cdot \log \left(\frac{s+n}{n} \right) \quad (4)$$

式中: L_z 为景深; B_z 为 z 方向上的空间带宽。在公式(4)中, 空间带宽积、时间带宽积和信噪比决定了系统的自由度, 即系统的信息容量。对于常见的静态成像或者缓慢变化的场景成像, 时间带宽积常被牺牲以换取大的空间带宽积。而有关信噪比与其他维度上的转换则讨论较少。

从光学成像系统信息承载能力守恒的角度去理解分辨率提升问题, 分辨率作为其中一个变量, 可以通过调整系统内的其他参数来改变, 这是超分辨成像与空间带宽积扩展的理论基础。

1.3 空间带宽积与维格纳函数(Wigner function)

一幅图像的信息容量由它在空域-频域中覆盖的面积决定, 也即维格纳函数^[62], 如图 2 所示。维格纳函数分布中所围成的面积便可以看作是空间带宽



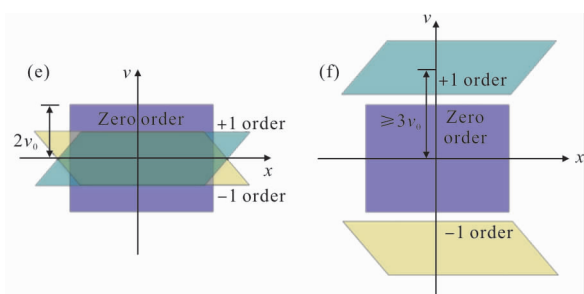


图 2 空间带宽积(SBP)的维格纳函数表示。(a)物体图像的 SBP 分布;(b)物体图像傅里叶变换的 SBP 分布;(c)物体自由空间传播菲涅尔变换后的 SBP 分布;(d)物体经过透镜后的 SBP 分布^[57];自由空间传播菲涅耳全息图维格纳函数分布 (e) 同轴全息图的 SBP 分布,0 级与 ± 1 级的频谱重叠;(f)离轴全息图的 SBP 分布, ± 1 级与 0 级频谱分离^[60]

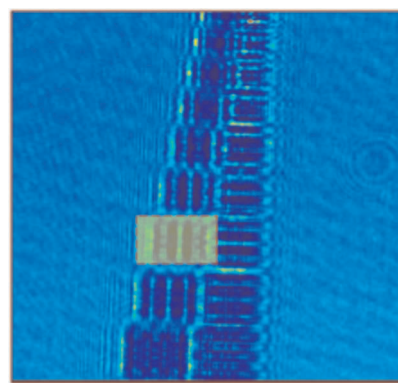
Fig.2 SBP representation in Wigner space. (a) SBP distribution of an object image; (b) SBP distribution of the Fourier transform of the object; (c) SBP distribution after free-space Fresnel propagation; (d) SBP distribution after transmission through a lens ^[57]; SBP distribution of free-space Fresnel hologram with (e) in-line geometry where 0 order and ± 1 order are overlapped and (f) off-axis geometry where 0 order and ± 1 order are separated^[60]

积,因此维格纳函数可以视为系统空间带宽积的一个度量,并且其更加准确,因为它不仅给出了空间带宽积的值,也给出了空间带宽积的分布情况。图 2 示例中的傅里叶变换,自由空间菲涅耳传播以及透镜成像等操作不会改变空间带宽积的值,即图中所围成的面积,有像差的光学系统则会改变空间带宽积的值。

理解维格纳函数对于掌握数字全息频谱分布以及对数字探测器的带宽要求很有帮助。图 2(e~f)给出了同轴和离轴记录方式下的全息图的维格纳函数分布。全息图零级的空间频率范围变为物体空间频率的两倍,这是物体自相关导致频谱展宽一倍而引起的。离轴全息中+1 级和-1 级频谱与零级分离,是因为离轴参考引起的频率移动,将 ± 1 级频谱移动到高频位置,便于和零级分离,但同时也提高了对数字探测器采样带宽的要求。

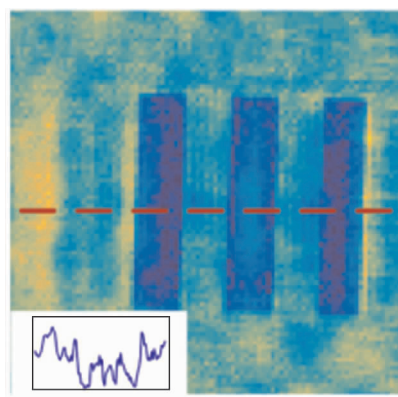
通过观察全息图的维格纳函数分布,可以直观地发现,同轴全息对于数字探测器的空间带宽积的要求最低,利用率也最高,然而由于三个级次混在一起,无法分离,需要用相移技术得到+1 级或者-1 级后再重建^[63],牺牲时间带宽积以充分利用

空间带宽积;或者利用优化算法消除零级和孪生像的影响^[64-66],后者在不牺牲时间带宽积的前提下,充分有效利用了探测器件的空间带宽积,将硬件成本转换成了计算成本,其中的压缩感知方法还可以用一幅同轴全息图同时重建多层物体,并消除零级和孪生像的影响,如图 3 所示。在离轴全息中,虽然+1 级或-1 级已经与其他两个级次分离,但是只



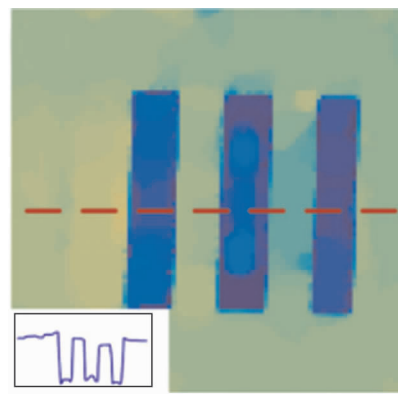
(a) 同轴全息图

(a) In-line hologram



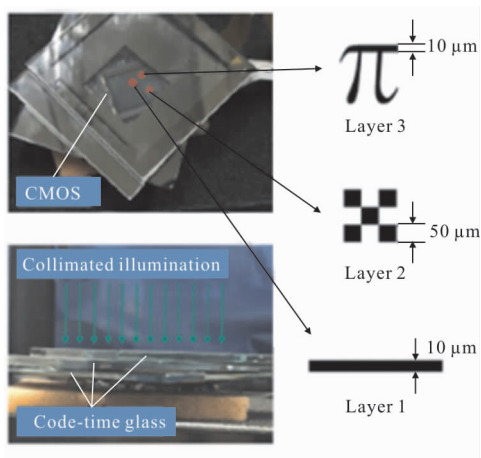
(b) 传统回传方法重建结果

(b) Traditional back-propagation reconstruction



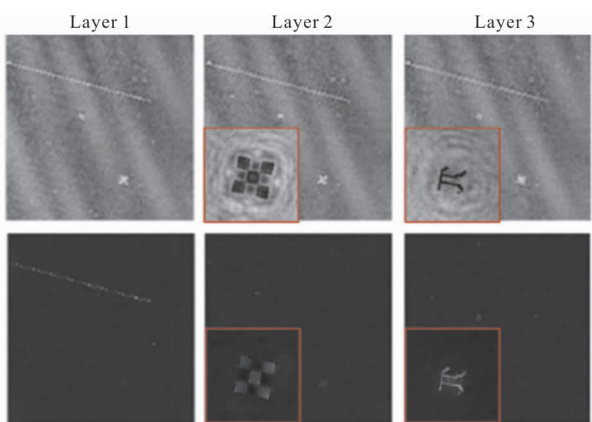
(c) 压缩感知重建结果^[65]

(c) Compressive sensing reconstruction^[65]



(d) 多层物体同轴全息模型

(d) Multi-layer object in-line holographic model



(e) 传统回传方法重建(上)与压缩感知方法重建(下)^[66]

(e) Traditional back-propagation reconstruction (top) and compressive sensing reconstruction (bottom)^[66]

图 3 压缩感知用于消除同轴全息中孪生像与零级影响以充分有效利用探测器的空间带宽积

Fig.3 Compressive sensing is used to eliminate the twin image and zero-order effects in the in-line hologram to fully utilize the SBP of the detector

占数字探测器的空间带宽积的四分之一,在二维情况下占比更小。充分利用离轴全息中探测器的空间带宽积是一种扩展视场或者提升分辨率的有效方法^[42, 67-68]。

2 基于数值孔径扩展的分辨率增强

从 1.1 节的分析中可以看出,对于受限于数值孔径而导致分辨率不高的情况,有效的手段便是扩展数值孔径以增强分辨率,其方法主要是收集到物体更多的高频信息,此节介绍几种常用的扩展数值孔

径的方法:倾斜照明、结构光照明、随机调制照明、多位置综合孔径探测等。

2.1 倾斜照明数字全息显微镜

如图 1 所示,当照明光正入射样本时,样本的低频散射光被系统收集,而高频信息因为超过系统的截止频率($\sim NA_{obj}/\lambda$)而丢失。倾斜照明的作用便是把原先不能通过系统的高频信息通过移频的方式“搬运”到系统的频率通带内,该过程可表示为:

$$u(x, y) = h(x, y) \otimes [o(x, y) \exp(ik_{xi}x + ik_{yi}y)] \quad (5)$$

式中: $h(x, y)$ 为系统的点扩散函数; \otimes 为卷积; $u(x, y)$ 为物体透过率函数 $o(x, y)$ 经过系统后到达探测器平面的复振幅分布; $\exp(ik_{xi}x + ik_{yi}y)$ 为倾斜照明光; $k_{xi} = 2\pi \sin\alpha/\lambda$, $k_{yi} = 2\pi \sin\beta/\lambda$, α 和 β 分别是倾斜照明光在 x 和 y 方向上相对于光轴的夹角。对公式(5)进行傅里叶变换,倾斜光照明的频移效果则更加直观。

$$U(k_x, k_y) = H(k_x, k_y) O(k_x - k_{xi}, k_y - k_{yi}) \quad (6)$$

式中: $U(k_x, k_y)$ 为输出复振幅的傅里叶频谱; $H(k_x, k_y)$ 为系统的频域传递函数; $O(k_x - k_{xi}, k_y - k_{yi})$ 为发生频移的物体的傅里叶频谱。公式(6)表示所有满足公式(7)的频率成分都可以被收集到。

$$\sqrt{(k_x - k_{xi})^2 + (k_y - k_{yi})^2} \leq 2\pi NA_{obj}/\lambda \quad (7)$$

因此,可以通过控制照明光相对于光轴的夹角 α, β ,将不同范围内的物体的傅里叶频谱“搬运”到系统的频率通带 NA_{obj}/λ 内,重建时再将这频率成分“搬运”回正确的位置,进行孔径合成,实现分辨率增强,如图 4(a)所示。孔径合成后,等效的数值孔径变为 $NA_{eff} = NA_{obj} + NA_{illu}$,这里的 NA_{illu} 是倾斜照明最大角度的正弦值,因为角度正弦值不会超过 1,所以倾斜照明分辨率增强受限于倾斜照明的最大角度。同时因为有了倾斜照明带来的数值孔径的增强,系统本身的数值孔径一般选在 $NA_{obj} = 0.5$ 左右,以保证较大的视场,当然也存在本身数值孔径很大,追求更高分辨率的情况^[2]。使用垂直腔表面发射激光光源(VCSEL)照明提高分辨率的情况也可以用倾斜照明解释。

孔径合成以及图像重建是数字化的,在计算机上编程完成。因为孔径合成是一个“相干”过程,在将不同频谱“搬运”回正确位置时,必须保证相位是准确的,即每个子孔径的移动量以及相邻孔径之间的

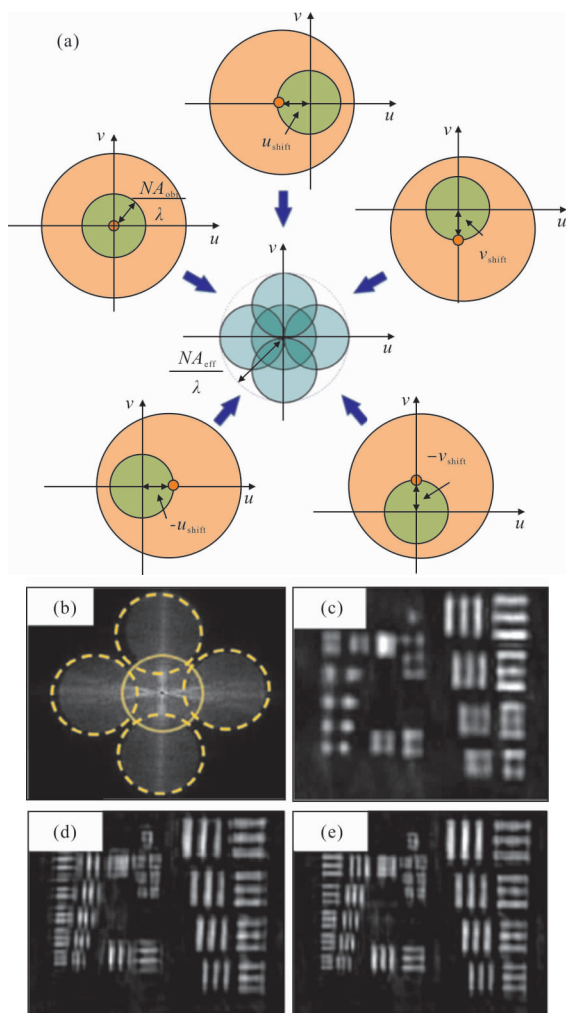


图 4 (a) 倾斜照明实现频谱“搬运”,不同照明角度将不同的频率信息“搬运”到系统通带内(图中浅绿色圆圈代表系统频率通带,橘黄色大圆代表物体空间频谱信息),然后进行频谱合成实现等效数值孔径增强。孔径间相位匹配对于超分辨率重建的影响 (b) 合成频谱;(c) 只用中间频谱重建的低分辨率图像;(d) 利用合成频谱但不采用相位匹配的高分辨率重建图;(e) 利用合成频谱并采用相位匹配后的高分辨率重建图^[69]

Fig.4 (a) Oblique illumination for spatial spectrum synthesis, different illumination angles carry different frequency components of the object into the passband of the system (green circle indicates the system passband, the orange circle indicates the spatial spectrum of the object). Then the spatial spectrum is synthesized for a higher effective NA effect of phase matching between apertures on super-resolution reconstruction (b) synthesized spectrum; (c) low-resolution reconstruction using only the central spectra;(d) high-resolution reconstruction using synthesized spectra but without phase matching; (e) high-resolution reconstruction using synthesized spectra with phase matching^[69]

相对位置要正确。因为实验过程中,设计的倾斜角度和实际的倾斜角度可能会有偏差,因此在频谱合成时需要对每个频谱相位做一定的细调以保证最终重建图的质量。这些相位偏差通过计算得到并用低阶多项式拟合,产生一个估计的相位分布 $\varphi(x, y)$,对应的物光复振幅乘上 $\exp(-i\varphi(x, y))$ 以补偿该相位偏差。图 4(b)~(e)展示了相位偏差对于最终重建的高分辨率图像的影响,当相位偏差被补偿掉后,才能获得高质量的重建图。

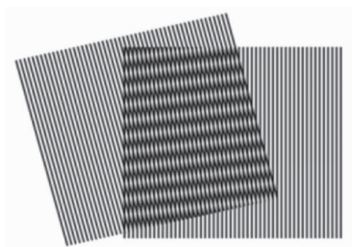
通过计算得到相位偏差进而补偿的方法有两大类:(1) 给定一个评价指标,通过计算每个子孔径间重合区域的评价指标值进行数学优化;(2) 以重建图像质量作为评价指标进行相位偏差计算。第一种方法中,通过计算相邻孔径间重叠区域的互相关^[15, 54, 70],或者其他参数,如锐度^[71-72],均方误差^[17]等作为一个定量的评价指标。这种情况下,重叠区域越大,重建质量越高,然而需要大量的倾斜照明来提高分辨率。第二种方法不存在这类问题,可以用最终重建图像质量与相邻全息图之间的谱能量分布比作为评价指标,通过最大化这两个参数来实现相位偏差的计算以及补偿^[53]。

2.2 结构光照明数字全息显微镜

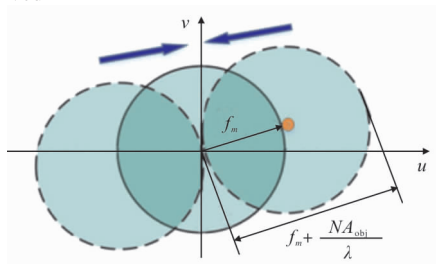
在倾斜照明下,原先不能通过光学系统的高频信息被移动到系统频率通带内而被探测到,通过扩展频域带宽而增强分辨率。结构光照明也是将原先不能通过光学系统的高频信息移动到频率通带内而探测,具体的移动方法是莫尔条纹效应,即如果一个未知的目标图案乘上一个已知的规律的照明图案,则会得到两者的拍频图案,称之为莫尔条纹。莫尔条纹出现在两者的空间频率存在差异的地方,并且其频率是两者的频率差,因此能够通过光学系统被探测到。因此原先未知图案无法通过系统的高频频率成分可以在“拍频”之后转化为低频通过,如图 5(a)所示,根据探测到的莫尔条纹图案以及已知的照明光的空间频率,计算重建待成像样品,结构照明可选用正弦或者方波调制图案。

以一个实际例子说明结构光照明实现数字全息分辨率增强的原理,如图 5(c)~(d)所示。4 个不同方向的二值相位图上载到相位型空间光调制器上,每个方向上载 3 幅,存在一定的相移,并依次投射到物体上实现结构光照明,经过光学系统后与一倾斜参

考光干涉,形成全息图。虽然使用的是二值相位(可以理解为方波,由傅里叶变换可知,其可分解为无穷个不同频率的正弦波的叠加),但是由于光学系统存在带宽限制,只允许低频的正弦波分量通过,因此等效于正弦调制。用 φ_{mn} 代表不同的照明图案, $m=1, 2, 3, 4$ 代表 4 个条纹方向, $n=1, 2, 3$ 代表每个方向下 3 幅图案之间的相移级次, $\phi_{m,n}$ 代表在 φ_{mn} 照明下经过

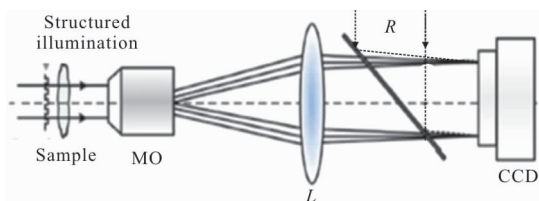


(a) 两个含有高频信息的图案形成的莫尔条纹,频率差对应的低频图案可以被清晰地观察到
 (a) Moiré fringes formed by two patterns containing high frequency information, the low frequency pattern corresponding to the frequency difference can be clearly observed

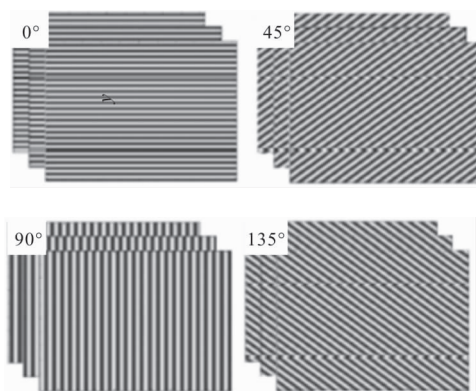


(b) 在条纹调制方向上((a)中左侧条纹),落在 $f_m + \frac{NA_{obj}}{\lambda}$ 区域内的频率信息被移动到探测范围内(中间实线圆圈),可以被探测到, f_m 为调制条纹的频率。结构光照明数字全息显微光路及其超分辨结果

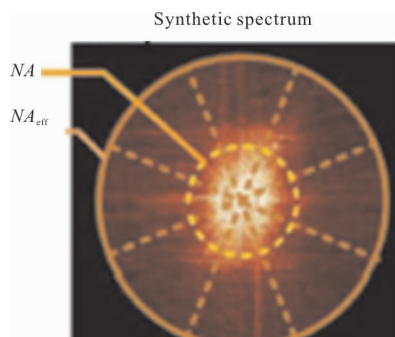
(b) High frequency components inside the range of $f_m + \frac{NA_{obj}}{\lambda}$ along the modulation direction of fringe (leftside fringe in (a)) is shifted to the system passband and detected(the middle solid circle). f_m is the frequency of the modulated fringe. Structured light illumination digital holographic microscopic system and its super-resolution results



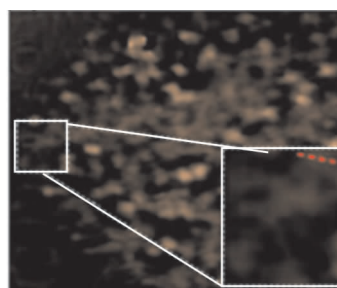
(c) 光路示意图
 (c) System diagram



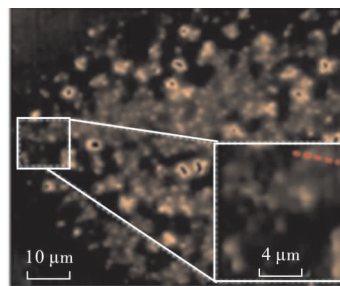
(d) 4 组不同方向的条纹图案
 (d) 4 sets of fringe patterns in different directions



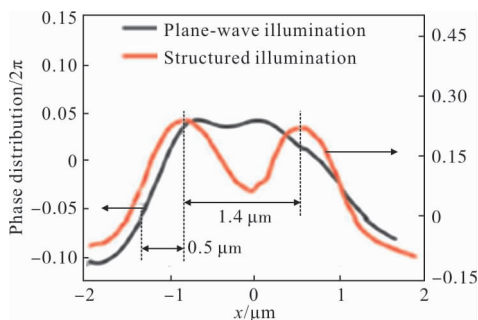
(e) 合成频谱
 (e) Synthesized spectrum



(f) 平面波照明重建图像
 (f) Reconstruction with plane wave illumination



(g) 结构光照明重建图像
 (g) Reconstruction with structured light illumination



(h) 图(d)、(e)中虚线处的一维相位分布曲线^[31, 69]

(h) One-dimensional phase distribution curve at the dotted line in (d) and (e)^[31, 69]

图 5 结构光照明分辨率增强原理

Fig.5 Principle of structured light illumination for resolution enhancement

光学系统在全息面上的物光场分布, 该分布可以由离轴全息频谱分离方法从对应的全息图 I_m 获得。因为 $\phi_{m,n}$ 是在正弦调制照明下得到的, 其可以分解为 3 个衍射级次对应的物光波分量 $A_{m,-1}$, $A_{m,0}$ 和 $A_{m,1}$ 。若同一方向上 3 幅图之间的相移增量是 θ , 那么有:

$$\phi_{m,n} = \eta_{-1} e^{-in\theta} A_{m,-1} + \eta_0 A_{m,0} + \eta_1 e^{in\theta} A_{m,1} \quad (8)$$

式中: η_{-1} , η_0 和 η_1 分别为三个衍射级次的幅值, 由衍射效率决定。对应于不同衍射级次的物光波 $A_{m,-1}$, $A_{m,0}$ 和 $A_{m,1}$ 可以通过如下矩阵运算得到:

$$\begin{bmatrix} A_{m,-1} \\ A_{m,0} \\ A_{m,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{-1} e^{-i\theta} & \eta_0 & \eta_1 e^{i\theta} \\ \eta_{-1} e^{-i2\theta} & \eta_0 & \eta_1 e^{i2\theta} \\ \eta_{-1} e^{-i3\theta} & \eta_0 & \eta_1 e^{i3\theta} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \phi_{m,1} \\ \phi_{m,2} \\ \phi_{m,3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

得到物光波三个级次后, 在傅里叶频谱域进行频谱合成, 然后逆傅里叶变换到空域得到分辨率增强的重建图像。每个方向上一般至少有 3 幅不同相移的照明图案, 因为每一幅照明图案下, 都有三个衍射级次的物光波叠加在一起, 想要分离并得到每个级次下的物光波, 需要至少 3 个独立的方程, 因此最少的相移照明图案是 3 幅。而不同方向的照明图案则是为了实现各向同性的分辨率增强。

倾斜照明分辨率增强效果受限于最大倾斜角度, 而结构光照明则受限于最大调制频率, 以正弦调制为例, 假设调制照明图案为:

$$I_{\text{illu}} = 1 + \frac{m}{2} (\cos 2\pi f_m x + \varphi) \quad (10)$$

式中: m 为条纹调制深度; f_m 为调制频率; φ 为条纹

相位。与高频信息无法通过带宽有限光学系统导致分辨率受限相同, 有限带宽的照明系统也无法产生无限高调制频率的结构照明, 若照明系统的数值孔径为 NA_{illu} , 则最高调制频率为 $f_1 = NA_{\text{illu}}/\lambda$, 可以被系统收集的物体的最高频率为 $f_{\text{max}} = NA_{\text{illu}}/\lambda + NA_{\text{obj}}/\lambda$, 系统等效数值孔径变为 $NA_{\text{eff}} = NA_{\text{illu}} + NA_{\text{obj}}$, 若系统的照明数值孔径与物镜数值孔径相同, 则结构光照明将系统分辨率提高一倍。结构光照明不仅可以提高横向分辨率, 对于轴向分辨率的提升也有帮助^[73]。同时, 一些光栅调制照明的工作也可以类比结构光照明分析, 因为大多数结构光使用正弦条纹照明物体, 而光栅本身就是一种“正弦条纹”。

将分辨率提升一倍的是线性结构光照明, 在荧光成像中, 利用荧光蛋白的饱和激发可以实现高于一倍分辨率提升的非线性结构光照明^[74]。荧光成像属于非相干成像, 而数字全息属于相干成像, 结构光照明在这两个不同领域的应用尽管都可以提升分辨率, 但也存在一个显著的差异。对于结构光照明相干成像, 其分辨率提升效果与同时用两束空间频率分别是 f_m 和 $-f_m$ 的倾斜平面波照明或者顺序依次照明完全相同。在荧光成像中, 顺序依次倾斜光照明对于分辨率的提升没有任何帮助^[75]。

2.3 随机调制数字全息显微镜

随机调制^[37-76]是相对于有序调制而言的, 在倾斜照明与结构光照明中, 高于系统截止频率的高频信息被“搬运”到光学系统通带内的方式是已知的, 因此可以利用这些已知的先验知识对得到的频谱进行确定性的合成。在随机调制中, 利用一块随机相位板调制物光波或者照明光, 将系统通带之外的高频信息随机地“搬运”到通带内, 这就需要在实验中标定“随机”或者在重建中使用优化约束算法将高频信息解算出来以实现分辨率增强。

图 6(a)展示了实验中标定“随机”的光路结构^[37], 在照明光路中, 一个全息散射元件用来产生随机散斑照明场, 采用一个扫描振镜控制入射到全息散射原件上的角度, 在未放入物体和放入物体条件下, 分别用振镜扫描得到一系列在不同入射角度下的全息图, 分别用 I_w^i 与 I_o^i 表示, i 表示第 i 个照明角度。参考光路中使用两个声光调制器实现相移记录, 可由全息图 I_w^i 与 I_o^i 恢复出全息面上的物光场 A_w^i 与 A_o^i , 因

为光源的相干长度大于散射元件的散射长度，因此物体的复振幅场可以通过 A_o^i 除以 A_w^i 得到，在此过程中，不含有物体的背景光场 A_w^i 的作用是标定随机调制在不同角度下的特性，为提取物体信息做参考。在上述 A_o^i 与 A_w^i 相除的过程中， A_w^i 中的奇点可能会影响相除的结果，利用不同照明角度下奇点分布不同这一特点，对每一组对应角度下含有或不含有物体的光场相除的结果 $E^i = A_o^i / A_w^i$ 作平均，可有效消除奇点对重建图像的影响。

随机调制照明可以看作是不同角度平面波照明的叠加，因此其提高分辨率的原理与倾斜照明类似。在图 6(a)~(d)所示的工作中，平面波照明下系统点扩散函数的半高全宽为 516 nm，随机调制照明下系统点扩散函数的半高全宽为 305 nm，提升了约 1.7 倍。与结构光照明类似，通过降低不同层之间的相关性，随机照明也可以增强轴向分辨率。

图 6(e)~(i)所示光路则是通过随机调制物光波，将高频信息“搬运”到系统通带内，然后利用优化算法实现高分辨重建，不需要多次照明进行随机标定，然而需要提前测得随机相位板的透射率函数 $t(x,y)$ ^[76]。为了在优化算法中对物体施加约束，图 6(e)中紧贴物体放置一个小孔 $P(x,y)$ ，作为物体的空间支撑。物体经平面波照明，传播到随机相位板处被其调制，然后再传播到探测器平面，与倾斜参考光干涉形成离轴全息图。物体在探测器平面上的复振幅分布 $U(x,y)$ 可以由离轴全息图中频谱滤波得到。使用类似混

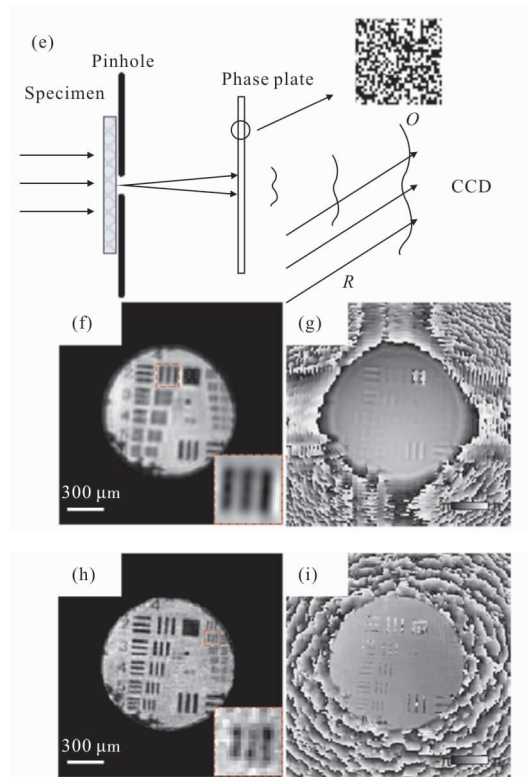
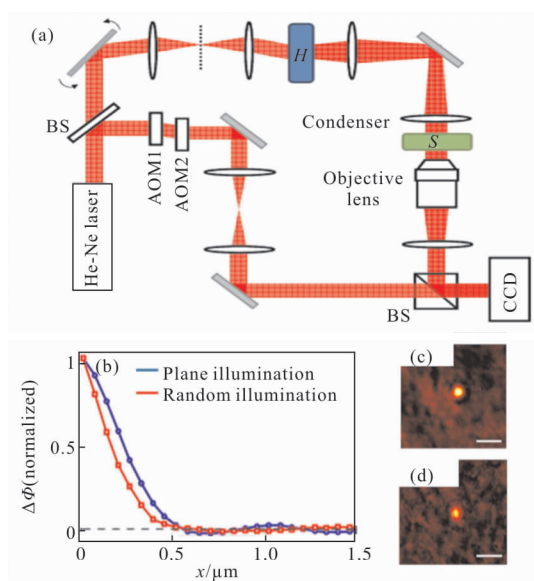


图 6 随机调制照明数字全息光路及其超分辨结果。(a)光路图， H 代表全息散射元件，实现随机调制照明， RM 为旋转镜，改变入射到全息散射原件上的角度，以改变随机照明的调制图案；(b) 平面波照明与随机调制照明系统半高宽对比曲线；(c)平面波照明下直径 200 nm 的粒子成像结果；(d) 随机调制照明下直径 200 nm 的粒子成像结果，图中标尺为 500 nm^[37]。物光随机调制数字全息光路及其超分辨结果；(e)光路图；(f)~(g)无随机调制振幅、相位重建结果；(h)~(i)随机调制下振幅、相位重建结果^[76]

Fig.6 Random modulation illumination digital holography and its super-resolution result. (a) system diagram, H represents the holographic scattering diffuser, realizing random modulation illumination, and RM is the rotating mirror to change the illumination angle onto the holographic scattering diffuser; (b) Lateral point spread functions with plane illumination and random modulation illumination; imaging result of 200 nm diameter particle under (c) plane wave illumination and (d) random modulation illumination, the scale bar is 500 nm^[37]. Object-wave random modulation digital holography and its super-resolution results (e) system diagram; (f)~(g) amplitude and phase reconstruction without random modulation; (h)~(i) amplitude and phase reconstruction with random modulation^[76]



合输入输出相位恢复算法进行优化迭代, $P(x,y)$ 与 $U(x,y)$ 分别作为物体平面与探测器平面上的约束, 在该算法中, 探测面上使用的是复振幅约束而非强度约束^[64]。经过迭代优化后的重建图像如图 6(h)~(i) 所示, 相比于传统平面波正入射数字全息, 随机相位调制可以显著提高成像分辨率。

2.4 多位置综合孔径探测数字全息

在探测平面内二维移动探测器, 或者在物体平面内二维移动物体可以收集更多物体信息, 增大系统的等效数值孔径^[50-56, 77]。以移动探测器为例, 物光波在探测平面上会有一个分布, 单个探测器的幅面大小不足以覆盖整个物光场, 因此二维移动探测器, 可以得到多幅含有不同物光波信息的全息图, 从这些全息图中得到对应的物光波 (离轴或者相移方法等), 进行孔径合成, 可提高分辨率。与倾斜照明中孔径合成类似, 一般而言, 相邻两个探测器位置要求有一定的重合, 以提供重建算法中要求的频谱相对位置信息, 也有一些工作在无重合的情况下进行孔径合成^[53]。移动探测器与移动物体不仅可以提高分辨率, 而且也可以增大成像视场, 其系统结构与分辨率提升效果如图 7 所示。

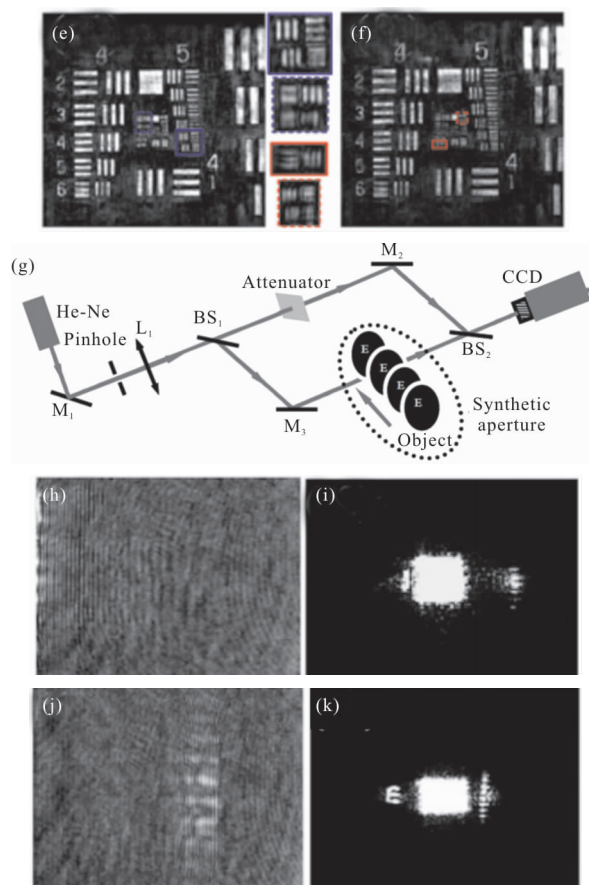
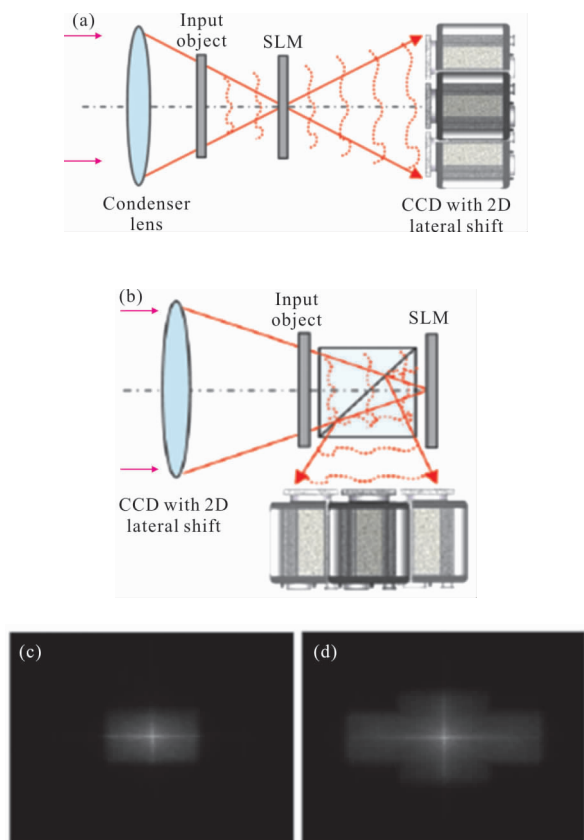


图 7 多位置综合孔径系统及其超分辨结果。(a~f) 探测器移动: (a~b)透射、反射式光路示意图;(c)单个探测器位置(中间位置)获得图像的频谱;(d)5个探测器位置(中间及上下左右)获得图像的合成频谱;(e)对应(c)的重建图像;(f)对应(d)的重建图像^[51]。(g~k)物体移动:(g)光路示意图;(h)物体在某个位置上获得的全息图;(i)对应(h)的重建图像;(j)物体移动4次获得4幅全息图的合成全息图;(k)对应(j)的重建图像^[52]

Fig.7 Multi-position synthetic aperture system and its super-resolution result. (a-f) Detector shifting mode: (a-b) transmission and reflection system diagram; (c) spatial spectrum of the detected object wave with only the central detector position; (d) spatial spectrum of the detected object wave with five detector positions (central, up, down, left and right); (e) reconstruction using the spatial spectrum in (c); (f) reconstruction using the spatial spectrum in (d)^[51]. (g-k) Object shifting mode; (g) system diagram; (h) captured hologram corresponding to one object position; (i) reconstruction from (h); (j) synthetic hologram with 4 sub-holograms captured with 4 object positions; (k) reconstruction from (j)^[52]

3 基于像素超分辨的数字全息显微技术

上一节主要分析了基于数值孔径扩展的分辨率增强方法,主要适用于系统数值孔径有限,高频信息不能被光学系统收集的情景。此节主要讨论在无透镜片上全息系统中,由于数字探测器的像素尺寸有限,即使在数值孔径足够的情况下,高频信息仍不能被解析的问题。目前,数字探测器的像素尺寸一般为几个微米,已经与全息显微镜的分辨率相当。尽管减小像素尺寸会提升片上全息系统的分辨率,但是随着像素尺寸的减小,探测图像的信噪比会下降,因此成像分辨率与信噪比之间需要平衡。为了保持高信噪比,在使用较大像素尺寸的探测器时,像素超分辨技术常被用来提高片上全息系统的分辨率。

典型的片上全息系统如图 8 所示,由 LED 点光源,待成像物体以及数字探测器组成,一般光源-物体之间的距离($z_1 \sim 10 \text{ cm}$)要远远大于物体-数字探

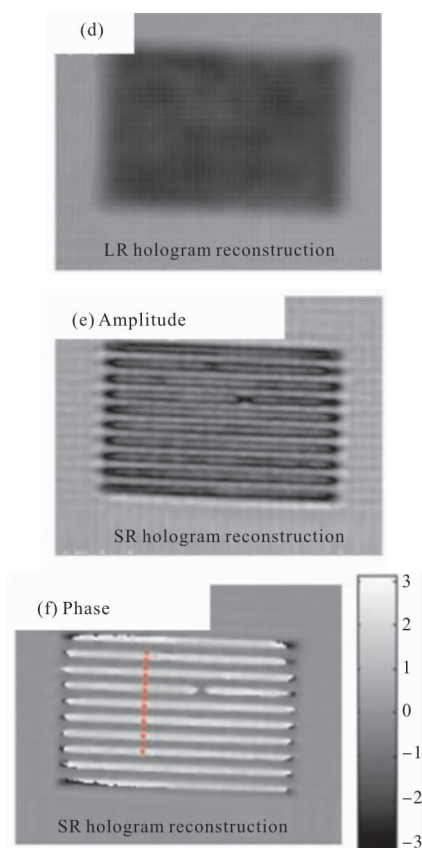
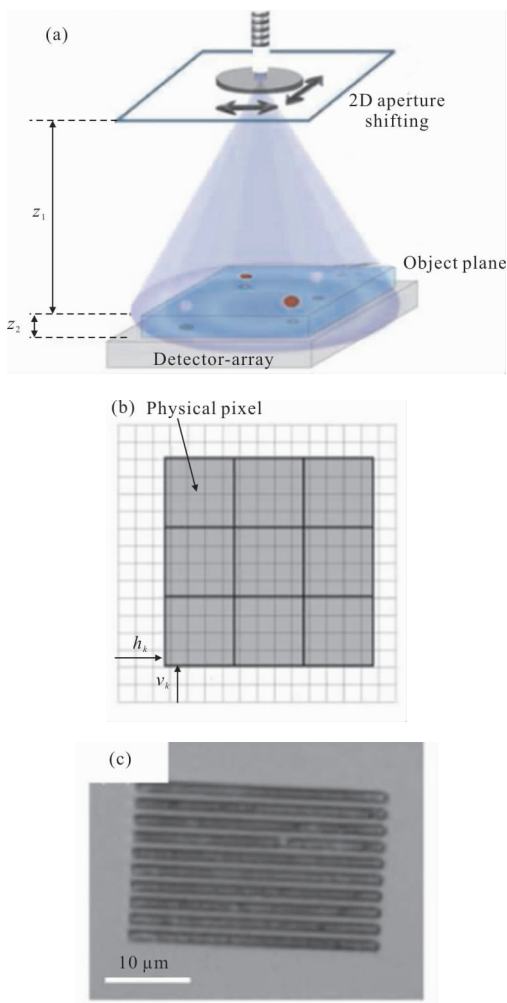


图 8 片上全息系统及其像素超分辨工作原理与结果 (a)光路图, $z_1 \gg z_2$; (b)像素超分辨工作原理,图中有粗体边框标记的为探测器实际物理像素, h_k 和 v_k 为第 k 帧相对于参考帧在水平和垂直方向移动的距离; (c) $NA=0.65$, 40 倍物镜下观察到的光栅图案,作为参考; (d)使用单帧全息图重建的振幅图像;使用 36 帧低分辨率全息图并结合像素超分辨方法重建的 (e)振幅和 (f)相位^[46]

Fig.8 On-chip holography system and its super-resolution results (a) system diagram $z_1 \gg z_2$; (b) principle of pixel super-resolution, physical pixels are marked by the bold border, h_k and v_k are the shifting distances of the k -th frame relative to the reference frame in the horizontal and vertical directions; (c) microscope image of a grating captured with a 40 X objective lens ($NA=0.65$); (d) amplitude reconstruction of the grating using a single low-resolution hologram; (e) amplitude and (f) phase reconstruction using 36 low-resolution holograms with the pixel super-resolution method^[46]

测器之间的距离($z_2 \sim 500 \mu\text{m}$),因此可以近似认为放大率为 1 的平面波照明,同时该系统的视场可以保持在 $\sim 10 \text{ mm}^2$ 量级。所谓像素超分辨,是指通过在各自平面内二维移动光源、物体或者数字探测器,造成

物体与数字探测器之间的相对位移,且位移量小于单个像素尺寸,每次位移后采集一幅全息图,然后通过优化算法合成一幅像素超分辨的全息图并用来重建物体,将成像重建分辨率提高到亚像素水平。因为光源-物体之间的距离远大于物体-数字探测器之间的距离,实现等效的物体与数字探测器之间的亚像素移动效果,探测器需要微米甚至亚微米的移动 S_{detector} ,而光源则只需要百微米的移动 S_{source} ,更加容易实现。在物体与探测器之间是空气填充的条件下,二者等效移动距离存在如下关系 $S_{\text{source}} \sim S_{\text{detector}} \times z_1 / z_2$ 。以移动光源为例,图 8 所示工作中^[46],照明光源使用部分相干光且照明孔径约为 $50 \mu\text{m}$,光源移动步长约 0.1 mm ,因为该工作中 z_1/z_2 大约为几百数量级,因此相当于数字探测器的亚微米移动。每个光源位置下拍摄一幅低分辨率全息图。因为像素超分辨算法中通过数值的方法确定移动步长,因此不要求知道实验中确切的移动步长。

若 $X_k(n_1, n_2)$ 代表低分辨率图像, $k=1, 2, \dots, p$, 每一幅图像的横向与纵向位移分别为 h_k 和 v_k , 像素数为 $M=N_1 \times N_2$; $Y(n_1, n_2)$ 代表高分辨率图像, 像素数为 $N=LN_1 \times LN_2$, 其中 L 为大于 1 的正整数。通过最小化公式(11), 可以从 p 幅低分辨率图像中由共轭梯度法得到一幅高分辨率图像^[46]。

$$C(Y) = \frac{1}{2} \sum_{\substack{k=1, 2, \dots, p \\ i=1, 2, \dots, M}} (x_{k,i} - \tilde{x}_{k,i})^2 + \frac{\alpha}{2} (Y_{\text{hpf}}^T \cdot Y_{\text{hpf}}) \quad (11)$$

式中: $x_{k,i}$ 为测得的第 k 幅低分辨率图像向量化后的第 i 个像素值; $\tilde{x}_{k,i}$ 为从得到的高分辨率图像 $Y(n_1, n_2)$ 中根据一定规律计算得到的第 k 幅图像的第 i 个元素的像素值, 该方法后面介绍, Y_{hpf} 是对 $Y(n_1, n_2)$ 的高通滤波操作, 得到 $Y(n_1, n_2)$ 的高频成分。公式(11)右侧第一项是计算探测器获得的低分辨率图与从 $Y(n_1, n_2)$ 中恢复的低分辨率图的平方误差, 第二项是 $Y(n_1, n_2)$ 中高频信息的惩罚项, 因子 α 是高频成分的一个权重因子, 当 α 很大时, 得到的高分辨率图像会变得平滑模糊, 当很小时, 则会出现高频噪声。从高分辨率图像 $Y(n_1, n_2)$ 中计算得到一系列低分辨率图像的核心是一个权重函数 $W_{k,i,j}(h_k, v_k)$ 。

$$\tilde{x}_{k,i} = \sum_{j=1, 2, \dots, N} W_{k,i,j}(h_k, v_k) y_j \quad (12)$$

式中: y_j 为向量化 $Y(n_1, n_2)$ 的第 j 个像素值。 $W_{k,i,j}(h_k, v_k)$ 是一个对应于 L^2 个高分辨率像素区域的二维高斯分布, 确定 L^2 个高分辨率像素对相应的单个低分辨率像素的权重系数, 如图 8(b) 所示。该工作使用一个 $2.2 \mu\text{m}$ 像素间隔的数字探测器, 通过横向纵向各移动 6 次总共记录 36 幅低分辨率全息图, 合成一幅像素超分辨的全息图用来重建物体, 实现了约 $0.6 \mu\text{m}$ 的横向分辨率的亚像素重建。移动物体^[78], 移动探测器^[79]或者波长扫描的方式^[79-80]也可以实现类似的亚像素成像效果。

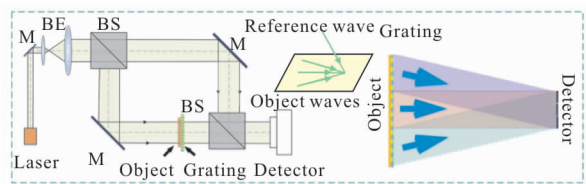
4 基于角度复用的大视场数字全息技术

空间带宽积的扩展不仅可以实现分辨率的提升, 也可以扩展成像视场。第 1 节分析了离轴全息系统空间带宽积利用率低的问题, 因为离轴参考的记录方式, 全息图的频谱面上 +1 级, 0 级和 -1 级互相分离, 而只有 +1 级或者 -1 级被利用, 同时, 傅里叶频谱的其他区域也没有被利用, 空间带宽积利用率有限。通过充分利用全息图频谱空间, 将原来没有被利用的部分利用起来, 如图 9(a)、(d) 所示, 每个级次对应不同的成像区域, 扩展成像视场。这种方法解决的是由于数字探测器靶面有限而导致的视场受限的问题, 即数字探测器不能完全覆盖经过光学系统后的视场, 而光学系统分辨率与视场的制约关系仍存在。

根据傅里叶光学可知, 全息图傅里叶频谱上不同位置的级次对应不同角度的干涉。利用不同角度照明不同区域, 通过角度复用的记录方式可以充分利用傅里叶频谱空间, 不同级次对应不同照明区域下的物体信息, 各级次分别重建后进行视场拼接便可以扩展视场。下面以光栅调制为例, 介绍角度复用扩展数字全息成像视场的原理。

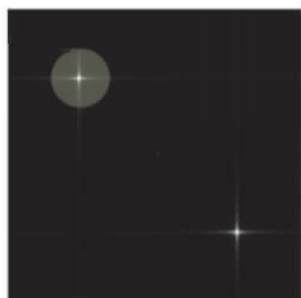
如图 9(a) 所示, 照明后的物光波被光栅调制, 物体的不同区域沿不同角度进入探测器, 光栅的三个级次产生的物光在水平面内分开, 参考光在从垂直方向上与它们干涉, 记录的全息图及其频谱如图 9(c)~(d) 所示。黄色椭圆内的三个级次分别对应不同入射角度的物光波, 分别对其作重建并拼接视场可以实现视场 3 倍于全息图尺寸的成像结果, 如图 9(e) 所示。为实现 3 倍视场的扩展, 系统参数之间需要满足条

件： $l\lambda/d=np$ ，其中 l 是从光栅到数字探测器的距离，



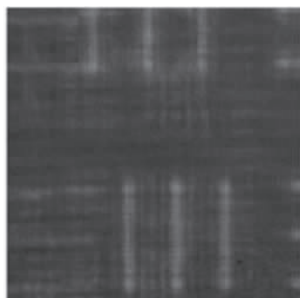
(a) 光路图

(a) System diagram



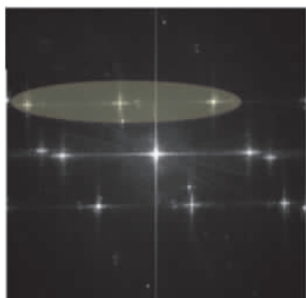
(b) 传统离轴菲涅耳全息图的频谱，仅黄色圆圈内 1 个级次被使用，利用率低

(b) Spatial spectrum of traditional off-axis Fresnel hologram, only one order is used with low utilization rate



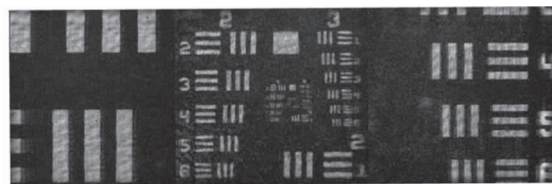
(c) 使用(a)中光栅调制获得的角度复用全息图

(c) Angle-multiplexing hologram based on grating modulation in (a)



(d) 对应(c)的频谱，3 个级次被利用，探测器空间带宽利用率增大

(d) Spatial spectrum of the hologram in (c), three orders are used, which enhances the SBP utilization



(e) 3 个级次重建并拼接后的结果，视场扩大为传统方法的 3 倍^[42]

(e) Reconstruction from three orders which expands the FOV three times compared to the conventional method^[42]

图 9 基于光栅调制的角度复用大视场数字全息系统

Fig.9 Grating modulation based angle-multiplexing large-FOV digital holography system

λ 是照明激光波长， d 是光栅周期， n 和 p 分别是数字探测器的像素数和像素大小。在工作^[42]中，光栅和物体紧挨在一起，是为了避免重建过程中可能出现的级次之间的串扰问题（避免串扰也有助于分辨率的提升^[81]）。这里光栅的三个级次对应的是物体的不同区域，与用光栅提高成像分辨率中，不同级次将物体同一区域的高频信息衍射到数字探测器中是不同的。基于相同的原理，提高离轴全息傅里叶频谱的利用率，可以实现 4 个级次^[82]或 6 个级次的高效利用^[68]；除了利用光栅外，通过加入角锥棱镜也可以提高离轴全息傅里叶频谱利用率，实现两倍的视场扩展^[67]。

5 结论与展望

文中系统地分析总结了高分辨率大视场数字全息成像技术，在提升分辨率方面，主要有两大类，一种是通过增大系统等效数值孔径提高分辨率，主要方法有倾斜照明、结构光照明、随机调制照明以及多位置综合孔径等方法；另一种是在片上全息系统中，数值孔径够大而分辨率受限于数字探测器像素大小情况下，通过像素超分辨提高高频信息的解析能力从而提高分辨率。在扩展成像视场方面，主要通过角度复用充分利用数字探测器的空间带宽积，不同角度的物光波携带物体不同部分信息，且在离轴全息的频谱图中分布在不同区域，通过分别重建以及视场拼接可实现大视场成像。

结合成像系统的自由度理论，大部分提高空间分辨率的方法牺牲了时间自由度，即针对同一物体，获得多幅含有不同信息的图像，然后根据一定规律

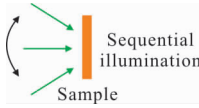

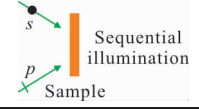

合成,提高分辨率;同时也有利用偏振-角度复用,波长-角度复用,光程差-角度复用等方法,实现单次曝光下分辨率增强的,所谓光程差-角度复用是指不同角度的光因为光程差不同到达探测器的时间不同,

在探测器的同一帧内实现多角度照明^[22]。表 1 中总结了各个物理量复用实现分辨率增强的方法,其中 OPD (Optical Path Difference)为光程差。

文中的超分辨指的是突破由于系统本身数值孔

表 1 分辨率增强的复用方法

Tab.1 Multiplexing method for resolution enhancement

Diagram	Method	Diagram	Method
	Angle multiplexing		Angle-wavelength multiplexing
	Angle-polarization multiplexing		Angle-OPD multiplexing

径或者像素尺寸有限而带来的分辨率提升,未来超分辨数字全息有两个方向可以探索,一是仍然沿着文中介绍的思路,利用角度,波长,偏振等多参数复用技术实现超分辨,充分发挥先进器件的优势以及设计更佳的恢复算法,研究如何用较少的数据量实现最大的分辨率提升;另一个则是探索可用的光学非线性效应,实现突破阿贝衍射极限的超分辨。同时,深度学习等新兴图像重建方法可以在传统方法的基础上,进一步通过增加像素数的方式提升成像分辨率。

参考文献:

[1] Park Y, Depeursinge C, Popescu G. Quantitative phase imaging in biomedicine [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12 (10): 578-589.

[2] Cotte Y, Toy F, Jourdain P, et al. Marker-free phase nanoscopy [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(113): 113-117.

[3] Nguyen T H, Kandel M E, Rubessa M, et al. Gradient light interference microscopy for 3D imaging of unlabeled specimens [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 210.

[4] Bianco V, Paturzo M, Marchesano V, et al. Optofluidic holographic microscopy with custom field of view (FoV) using a linear array detector [J]. *Lab on a Chip*, 2015, 15(9): 2117-2124.

[5] Yao Baoli, Lei Ming, Xue Bin, et al. Progress and applications of high-resolution and super-resolution optical imaging in space and biology [J]. *Acta*

Photonica Sinica, 2011, 40 (11): 1607 -1618. (in Chinese)

[6] Maire G, Drsek F, Girard J, et al. Experimental demonstration of quantitative imaging beyond abbe's limit with optical diffraction tomography [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(21): 213905.

[7] Alexandrov S A, Hillman T R, Gutzler T, et al. Synthetic aperture Fourier holographic optical microscopy [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(16): 168102.

[8] Arhab S, Soriano G, Ruan Y, et al. Nanometric resolution with far-field optical profilometry [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(5): 053902.

[9] Calabuig A, Micó V, Garcia J, et al. Single-exposure super-resolved interferometric microscopy by red-green-blue multiplexing [J]. *Opt Lett*, 2011, 36 (6): 885-887.

[10] Yuan C, Situ G, Pedrini G, et al. Resolution improvement in digital holography by angular and polarization multiplexing [J]. *Appl Opt*, 2011, 50 (7): B6-B11.

[11] Mico V, Zalevsky Z, García J. Synthetic aperture microscopy using off-axis illumination and polarization coding [J]. *Optics Communications*, 2007, 276(2): 209-217.

[12] Picazo-Bueno Já, Zalevsky Z, García J, et al. Superresolved spatially multiplexed interferometric microscopy [J]. *Opt Lett*, 2017, 42(5): 927-930.

[13] Mico V, Zalevsky Z, García-Martínez P, et al.

- Synthetic aperture superresolution with multiple off-axis holograms [J]. *J Opt Soc Am A*, 2006, 23(12): 3162–3170.
- [14] Mico V, Zalevsky Z, García-Martínez P, et al. Superresolved imaging in digital holography by superposition of tilted wavefronts [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(5): 822–828.
- [15] Thurman S T, Bratcher A. Multiplexed synthetic-aperture digital holography [J]. *Appl Opt*, 2015, 54(3): 559–568.
- [16] Price J R, Bingham P R, Thomas J C E. Improving resolution in microscopic holography by computationally fusing multiple, obliquely illuminated object waves in the Fourier domain [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(6): 827–833.
- [17] Schwarz C J, Kuznetsova Y, Brueck S R J. Imaging interferometric microscopy [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(16): 1424–1426.
- [18] Bühl J, Babovsky H, Kiessling A, et al. Digital synthesis of multiple off-axis holograms with overlapping Fourier spectra [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(19): 3631–3638.
- [19] Kim M, Choi Y, Fang-Yen C, et al. High-speed synthetic aperture microscopy for live cell imaging [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(2): 148–150.
- [20] Mico V, Zalevsky Z, Garcia-Martinez P, et al. Single-step superresolution by interferometric imaging [J]. *Opt Express*, 2004, 12(12): 2589–2596.
- [21] Zhao J, Yan X, Sun W, et al. Resolution improvement of digital holographic images based on angular multiplexing with incoherent beams in orthogonal polarization states [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(20): 3519–3521.
- [22] Yuan C, Zhai H, Liu H. Angular multiplexing in pulsed digital holography for aperture synthesis [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(20): 2356–2358.
- [23] Micó V, Zalevsky Z. Superresolved digital in-line holographic microscopy for high-resolution lensless biological imaging [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2010, 15(4): 046027.
- [24] Granero L, Zalevsky Z, Micó V. Resolution and field of view improvement in digital holography using a VCSEL source array [C]//10th Euro-American Workshop on Information Optics, 2011: 1–3.
- [25] Granero L, Micó V, Zalevsky Z, et al. Synthetic aperture superresolved microscopy in digital lensless Fourier holography by time and angular multiplexing of the object information [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(5): 845–857.
- [26] Lai X J, Tu H Y, Wu C H, et al. Resolution enhancement of spectrum normalization in synthetic aperture digital holographic microscopy [J]. *Appl Opt*, 2015, 54(1): A51–A58.
- [27] Zheng J, Gao P, Yao B, et al. Digital holographic microscopy with phase-shift-free structured illumination [J]. *Photon Res*, 2014, 2(3): 87–91.
- [28] Sánchez-Ortiga E, Martínez-Corral M, Saavedra G, et al. Enhancing spatial resolution in digital holographic microscopy by biprism structured illumination [J]. *Opt Lett*, 2014, 39(7): 2086–2089.
- [29] Lai X J, Tu H Y, Lin Y C, et al. Coded aperture structured illumination digital holographic microscopy for superresolution imaging [J]. *Opt Lett*, 2018, 43(5): 1143–1146.
- [30] Kashter Y, Vijayakumar A, Miyamoto Y, et al. Enhanced super resolution using Fresnel incoherent correlation holography with structured illumination [J]. *Opt Lett*, 2016, 41(7): 1558–1561.
- [31] Gao P, Pedrini G, Osten W. Structured illumination for resolution enhancement and autofocusing in digital holographic microscopy [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(8): 1328–1330.
- [32] Neumann A, Kuznetsova Y, Brueck S R J. Structured illumination for the extension of imaging interferometric microscopy [J]. *Opt Express*, 2008, 16(10): 6785–6793.
- [33] Chowdhury S, Izatt J. Structured illumination diffraction phase microscopy for broadband, subdiffraction resolution, quantitative phase imaging [J]. *Opt Lett*, 2014, 39(4): 1015–1018.
- [34] Lee K, Kim K, Kim G, et al. Time-multiplexed structured illumination using a DMD for optical diffraction tomography [J]. *Opt Lett*, 2017, 42(5): 999–1002.
- [35] Chowdhury S, Eldridge W J, Wax A, et al. Refractive index tomography with structured illumination [J]. *Optica*, 2017, 4(5): 537–545.

- [36] Wilde J P, Goodman J W, Eldar Y C, et al. Coherent superresolution imaging via grating-based illumination [J]. *Appl Opt*, 2017, 56(1): A79-A88.
- [37] Park Y, Choi W, Yaqoob Z, et al. Speckle-field digital holographic microscopy [J]. *Opt Express*, 2009, 17(15): 12285-12292.
- [38] Zheng J, Pedrini G, Gao P, et al. Autofocusing and resolution enhancement in digital holographic microscopy by using speckle-illumination [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(8): 085301.
- [39] Liu C, Liu Z, Bo F, et al. Super-resolution digital holographic imaging method [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(17): 3143-3145.
- [40] Paturzo M, Merola F, Grilli S, et al. Super-resolution in digital holography by a two-dimensional dynamic phase grating [J]. *Opt Express*, 2008, 16(21): 17107-17118.
- [41] Lin Q, Wang D, Wang Y, et al. Super-resolution imaging in digital holography by using dynamic grating with a spatial light modulator [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 66: 279-284.
- [42] Zhang W, Cao L, Jin G, et al. Full field-of-view digital lens-free holography for weak-scattering objects based on grating modulation [J]. *Appl Opt*, 2018, 57(1): A164-A171.
- [43] Lin Q. Resolution improvement mechanism and experiment study on digital holographic microscopic imaging [D]: Beijing: Beijing University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [44] Zalevsky Z, Gur E, Garcia J, et al. Superresolved and field-of-view extended digital holography with particle encoding [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(13): 2766-2768.
- [45] Greenbaum A, Luo W, Khademhosseini B, et al. Increased space-bandwidth product in pixel super-resolved lensfree on-chip microscopy [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1717.
- [46] Bishara W, Su T-W, Coskun A F, et al. Lensfree on-chip microscopy over a wide field-of-view using pixel super-resolution [J]. *Opt Express*, 2010, 18(11): 11181-11191.
- [47] Bishara W, Sikora U, Mudanyali O, et al. Holographic pixel super-resolution in portable lensless on-chip microscopy using a fiber-optic array [J]. *Lab on a Chip*, 2011, 11(7): 1276-1279.
- [48] Claus D, Fritzsche M, Iliescu D, et al. High-resolution digital holography utilized by the subpixel sampling method [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(24): 4711-4719.
- [49] Wu K, Wu X, Zhao L. Experimental research on super-resolution digital holography [J]. *Optical Technique*, 2018, 44(1): 101-105. (in Chinese)
- [50] Li Y, Lilley F, Burton D, et al. Evaluation and benchmarking of a pixel-shifting camera for superresolution lensless digital holography[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(9): 1643-1650.
- [51] Micó V, Granero L, Zalevsky Z, et al. Superresolved phase-shifting Gabor holography by CCD shift [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2009, 11(12): 125408.
- [52] Zhang Y, Lu X, Luo Y, et al. Synthetic aperture holography by movement of object [C]//SPIE, 2005, 5636: 8.
- [53] Jiang H, Zhao J, Di J, et al. Numerically correcting the joint misplacement of the sub-holograms in spatial synthetic aperture digital Fresnel holography [J]. *Opt Express*, 2009, 17(21): 18836-18842.
- [54] Massig J H. Digital off-axis holography with a synthetic aperture [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(24): 2179-2181.
- [55] Gyimesi F, Füzessy Z, Borbély V, et al. Half-magnitude extensions of resolution and field of view in digital holography by scanning and magnification[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(31): 6026-6034.
- [56] Huang H, Rong L, Wang D, et al. Synthetic aperture in terahertz in-line digital holography for resolution enhancement[J]. *Appl Opt*, 2016, 55(3): A43-A48.
- [57] Lohmann A W, Dorsch R G, Mendlovic D, et al. Space-bandwidth product of optical signals and systems[J]. *J Opt Soc Am A*, 1996, 13(3): 470-473.
- [58] Fellgett Peter B, Linfoot E H, Redman Roderick O. On the assessment of optical images [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1955, 247(931): 369-407.
- [59] Lukosz W. Optical systems with resolving powers exceeding the classical limit [J]. *J Opt Soc Am*, 1966, 56(11): 1463-1471.
- [60] Goodman J W. Introduction to Fourier Optics [M]. 3rd ed. New York: Roberts and Company Publishers, 2005.
- [61] Cox I J, Sheppard C J R. Information capacity and

- resolution in an optical system [J]. *J Opt Soc Am A*, 1986, 3(8): 1152–1158.
- [62] Bastiaans M J. Wigner distribution function and its application to first-order optics [J]. *J Opt Soc Am*, 1979, 69(12): 1710–1716.
- [63] Yamaguchi I, Zhang T. Phase-shifting digital holography [J]. *Opt Lett*, 1997, 22(16): 1268–1270.
- [64] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. *Appl Opt*, 1982, 21(15): 2758–2769.
- [65] Zhang W, Cao L, Brady D J, et al. Twin-image-free holography: a compressive sensing approach [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(9): 093902.
- [66] Zhang H, Cao L, Zhang H, et al. Efficient block-wise algorithm for compressive holography [J]. *Opt Express*, 2017, 25(21): 24991–25003.
- [67] Girshovitz P, Shaked N T. Doubling the field of view in off-axis low-coherence interferometric imaging [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3: e151.
- [68] Rubin M, Dardikman G, Mirsky S K, et al. Six-pack off-axis holography [J]. *Opt Lett*, 2017, 42(22): 4611–4614.
- [69] Micó V, Zheng J, Garcia J, et al. Resolution enhancement in quantitative phase microscopy [J]. *Adv Opt Photon*, 2019, 11(1): 135–214.
- [70] Li H, Zhong L, Ma Z, et al. Joint approach of the sub-holograms in on-axis lensless Fourier phase-shifting synthetic aperture digital holography [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(9): 2268–2272.
- [71] Tippie A E, Kumar A, Fienup J R. High-resolution synthetic-aperture digital holography with digital phase and pupil correction [J]. *Opt Express*, 2011, 19(13): 12027–12038.
- [72] Lim S, Choi K, Hahn J, et al. Image-based registration for synthetic aperture holography [J]. *Opt Express*, 2011, 19(12): 11716–11731.
- [73] Song S, Wan Y, Han Y, et al. Structure-illuminated self-interference digital holography for optical sectioning [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 46(5): 1–12. (in Chinese)
- [74] Gustafsson M G L. Nonlinear structured-illumination microscopy: Wide-field fluorescence imaging with theoretically unlimited resolution [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(37): 13081–13086.
- [75] Wicker K, Heintzmann R. Resolving a misconception about structured illumination [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(5): 342.
- [76] Jiang Z, Veetil S P, Cheng J, et al. High-resolution digital holography with the aid of coherent diffraction imaging [J]. *Opt Express*, 2015, 23(16): 20916–20925.
- [77] Zhao Y, Cao X, Chen B, et al. Digital holography subpixel displacement aperture synthesis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0626002. (in Chinese)
- [78] Zheng G, Lee S A, Yang S, et al. Sub-pixel resolving optofluidic microscope for on-chip cell imaging [J]. *Lab on a Chip*, 2010, 10(22): 3125–3129.
- [79] Wu Y, Zhang Y, Luo W, et al. Demosaiced pixel super-resolution for multiplexed holographic color imaging [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28601.
- [80] Luo W, Zhang Y, Feizi A, et al. Pixel super-resolution using wavelength scanning [J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5: e16060.
- [81] Paturzo M, Ferraro P. Correct self-assembling of spatial frequencies in super-resolution synthetic aperture digital holography [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(23): 3650–3652.
- [82] Lu Y, Liu Y, Li P, et al. Multiplexed off-axis holography using a transmission diffraction grating [J]. *Opt Lett*, 2016, 41(3): 512–515.