

# 基于菲涅耳波带板扫描的光学成像技术研究进展

吕笑宇 闫爱民 李 兵 孙建锋 刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 基于菲涅耳波带板(FZP)扫描的光学成像是主动式非传统成像技术,通过二维光学扫描实现对目标的三维高分辨率成像。阐述了目前几种不同类型的菲涅耳波带板扫描成像系统的原理、结构、性能,分析了国内外的研究现状和应用前景。

**关键词** 遥感;全息;菲涅耳波带板;光学扫描全息术;三维成像;光束扫描

**中图分类号** O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.081101

## Progress of Fresnel Zone Plate Scanning Imaging

Lü Xiaoyu Yan Aimin Li Bing Sun Jianfeng Liu Liren

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The Fresnel zone plate (FZP) scanning imaging is an active unconventional imaging system, which uses two-dimensional (2D) optical scanning to achieve three-dimensional (3D) high resolution imaging. The basic principle, system structure and performances of several different types of FZP scanning imaging systems are demonstrated. The developmental status and application foreground are analyzed.

**Key words** remote sensing; holography; Fresnel zone plate; optical scanning holography; three-dimensional imaging; beam scanning

**OCIS codes** 110.2990; 090.2870

## 1 引言

在成像观测应用中,光学和微波波段传统的成像技术因受天线孔径的限制,对感兴趣的目标超出分辨单元无法成像或识别细节<sup>[1]</sup>。因此,如何获取目标的高分辨率图像是低可观测性目标探测、高分辨率目标识别等领域不断追求的目标,在军事应用中特别是预警探测、战略防御和侦察监视等方面具有战略性发展地位。根据波动光学理论,传统光学成像系统分辨率受波长和系统孔径的限制,由于其工作波段范围一定,要提高系统的分辨率就必须增加系统孔径。但系统孔径的增大受加工工艺、材料以及飞行器有效载荷体积等因素的限制。而且大口径光学系统很容易受到大气湍流引起的闪烁、光束漂移以及大气散斑等问题的影响,使得接收端信号的信噪比降低,降低图像质量和分辨率。在微波波段,合成孔径雷达技术可实现米级以下的成像分辨率<sup>[2]</sup>。用激光替代微波,即合成孔径激光雷达,理论上成像分辨率可以达到厘米量级,但是大气信道会对成像质量产生影响,在技术上实现光频的相位同步比较困难<sup>[3]</sup>。利用激光在空域形成干涉条纹<sup>[4]</sup>,当目标经过干涉条纹时,探测器探测回波信号,对回波强度信号加以处理,还原出目标像的方法是一类重要的非传统高分辨成像技术。它的突出优点是利用光学编码的方法将获取的目标信息转换为时间分离的光学下行串进行探测,受传输介质扰动的影响小。

菲涅耳波带板(FZP)是一种常见的干涉光场分布形式。由于FZP函数的自相关性较好,在编码、解码后可以获得良好的图像重建效果,因此通常利用FZP光场作为光学扫描成像中的照明光场。FZP光场可以通过双

**收稿日期**: 2011-01-17; **收到修改稿日期**: 2011-03-25; **网络出版日期**: 2011-06-02

**基金项目**: 国家自然科学基金(60907006)资助课题。

**作者简介**: 吕笑宇(1984—),男,博士研究生,主要从事菲涅耳望远镜和信号处理等方面的研究。

E-mail: lvxiaoyu@siom.ac.cn

**导师简介**: 刘立人(1942—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间激光通信和激光雷达等方面的研究。

E-mail: lirenliu@mail.shenc.ac.cn

光路干涉、FZP 器件投影等方式产生。本文阐述了光学外差扫描全息术(OSH)、FZP 扫描全息术、菲涅耳望远镜等几种不同类型的 FZP 扫描成像系统的原理、结构、性能,介绍并分析了国内外的研究进展和应用前景。

## 2 光学扫描全息术

1979年,Poon等<sup>[5]</sup>在研究光学图像处理技术时,提出用光学外差扫描技术来记录物体的全息图,将传统的非相干扫描成像系统的单极性的光信号变成双极性的电信号。1985年,Poon<sup>[6]</sup>完成了 OSH 的理论研究,将其命名为扫描全息术,形成了 OSH 技术的雏形。1992年,该技术被最终命名为光学扫描全息术,并得到 OSH 第一个实验结果<sup>[7]</sup>。近年来,OSH 成为研究热点,国内外有多个小组在进行 OSH 系统理论和应用方面的研究,主要涉及扫描全息显微术、光学遥感、三维全息电视、光学切片等领域。

### 2.1 OSH 原理

OSH 利用时变菲涅耳波带片(TD-FZP,如图1所示)对三维目标进行二维扫描,获得目标的信息。OSH 系统由光学扫描和光学外差两部分构成,如图2所示。成像过程包括记录(编码)阶段和再现(解码)阶段<sup>[8]</sup>。

在记录阶段,同一光源发出的光被分成一束平面波和一束球面波,经声光器件调制后产生差频,在被测物体上干涉形成 TD-FZP。利用声光偏转器控制 TD-FZP 的偏转,实现对三维样品的二维扫描。当样品被扫描时,光电探测器接收传播到探测面的光,并产生外差电流输出。电流经过混频、放大等电学处理,产生解调信息并储存于计算机中,储存的信息是同轴 FZP 编码图像,本质上是包含了样品三维信息的全息图。在再现阶段,存储于计算机中的全息图可以通过数字方式再现。利用 FZP 对获得的全息图进行匹配滤波,获得样品的三维信息。

### 2.2 扫描全息显微术

OSH 最重要的应用成果之一是 Indebetouw 等<sup>[9]</sup>用 OSH 方法实现了混沌介质中荧光物体的成像和定位波长选在可见和近红外波段的光学成像。扫描全息显微镜能够获得荧光样本三维的全息信息,并且对生物活体无损伤、无电离辐射,使其成为了生物医学成像领域研究的热点<sup>[9]</sup>。

1998年,Indebetouw等<sup>[10]</sup>报道了利用 OSH 技术进行随机散射介质中物体的定位研究。用与人体组织十分相近质量分数为0.25%的聚苯乙烯水溶液作为混沌介质,被探测的物体是2根注入了荧光波长为600 nm的若丹明溶液的空芯光纤,将其埋入混沌介质中,横向距离为1 mm,纵向距离为12 mm。通过扫描记录和数字重建,清晰地显示了不同截面上光纤的像。这一实验从原理上证明了 OSH 用于生物医学成像的可能性。

2006年,Indebetouw等<sup>[11]</sup>利用扫描全息显微术,通过532 nm激光照射颤藻产生600 nm荧光,获得了分辨率优于1  $\mu\text{m}$ 的重建图像,如图3所示。这一实验证明了可以利用扫描全息显微术实现荧光生物样本的三维重建。

### 2.3 三维光学全息遥感和大尺度全息成像

与胶片相比,CCD的分辨率有限,因此利用传统的数字全息术捕获远距离目标或大尺寸目标存在一定困难。1999年,Kim等<sup>[12]</sup>提出利用 OSH 技术获得大尺寸目标的全息信息。2001年,Schilling等<sup>[13]</sup>完成了光学全息遥感的首次实验。成像目标由3个深度不同的反射物体组成,目标总的空间范围为15 cm  $\times$

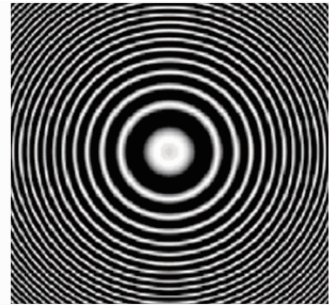


图1 某一时刻的 TD-FZP

Fig. 1 TD-FZP at a fixed time

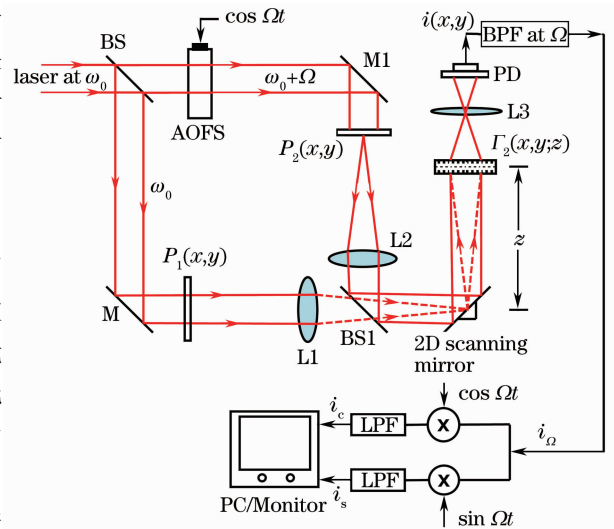


图2 OSH 原理图

Fig. 2 Schematic diagram of OSH

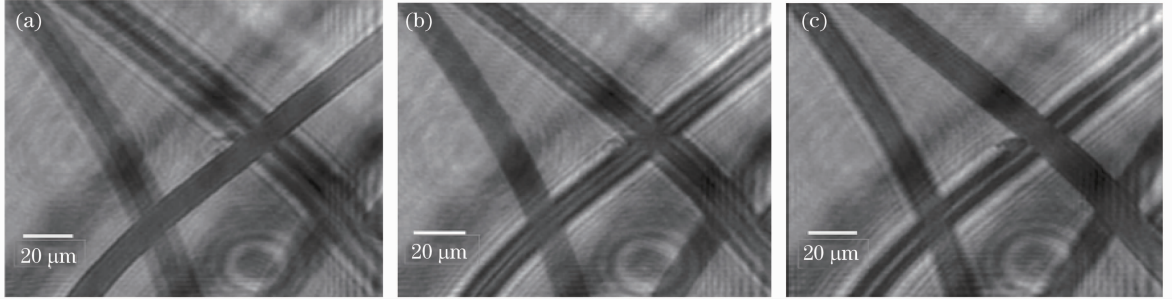


图3 颤藻叶在3个轴向距离上的重建图像。(a)  $z=130\ \mu\text{m}$ ; (b)  $z=155\ \mu\text{m}$ ; (c)  $z=180\ \mu\text{m}$

Fig. 3 Reconstruction of the intensity transmission of oscillatoria leaves (small algae) at three axial positions.

(a)  $z=130\ \mu\text{m}$ ; (b)  $z=155\ \mu\text{m}$ ; (c)  $z=180\ \mu\text{m}$

15 cm×30 cm。扫描系统与目标相距70 cm。利用接收的全息信息重建了不同深度的物体图像。这一实验证明了OSH具有对三维反射物体成像的能力,从而将OSH技术向军事领域延伸。

2004年, Park<sup>[14]</sup>实现了自然目标的光学全息遥感。图4(a)显示的是原始的三维目标,与OSH系统的距离 $z_0$ 为900 mm,体积为4 cm×3 cm×2 cm。图4(b)是目标的聚焦复数全息重建图像。

最近, Poon<sup>[15]</sup>提出将OSH的光学部分移植到飞机上,利用飞机进行类似合成孔径激光雷达的二维光栅扫描:将TD-FZP指向远距离目标,例如城市中的建筑物,对返回飞机的散射光进行电子处理,实现真正意义上的光学全息遥感。这一实验将具有较大的实用意义。

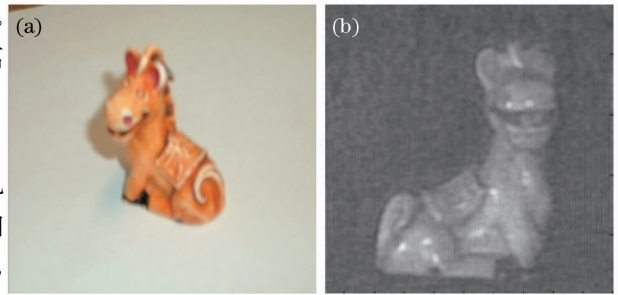


图4 (a)原始漫反射三维目标; (b)重建聚焦图

Fig. 4 (a) Natural diffusely reflecting object;

(b) reconstruction of focused image

## 2.4 三维全息电视

OSH技术的另一个应用领域是三维全息电视系统<sup>[16]</sup>,如图5所示。通常用于获取全息信号的录像机电视要受到有限的空间分辨率的制约,而该系统获得全息信号的方式不受这种限制;另外,该系统不需利用离轴全息的方式来消除孪生像的干扰,从而可以降低对数据传输速率和用于显示的空间光调制器空间分辨率的要求。

利用多光束来处理或编码目标,可以大大增强全息电视的信号传递能力。图6所示为多光束扫描的概念<sup>[17]</sup>。位于虚线右边的部分是传统OSH。位于虚线左边的是将不同频率和空间结构的光束结合在一起扫描目标,包含目标的多路编码信息负载于不同的外差频率上。利用多路探测体系可以对不同的编码信息进行同步提取。频率多路复用和多路分解是广播和电视中所必需的。还可以通过计算机发送信号到一个或多个

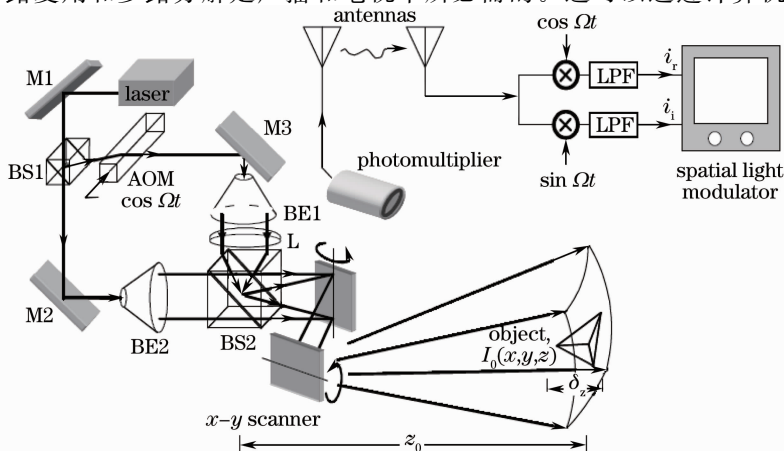


图5 基于OSH的三维电视系统

Fig. 5 3D television system using OSH

个空间光调制器上,用于实时相干重建。

利用全息技术实现三维目标高分辨率成像时,会产生大量的数据,为此 Tsang 等<sup>[18]</sup>提出一种基于增量调制(DM)的压缩全息数据的方式。这种方法适用于 OSH 获得的全息数据,从而增加了 OSH 系统实时应用的可能性。

该方法分为 3 个步骤:1)将复数全息转换为整合的实数全息,2)对实数全息沿垂直方向进行抽取,3)利用 DM 对实数全息进行压缩。

实验证明,采用这种方法可实现 64 倍的压缩比,且重建图像与利用原始的全息数据重建的图像相比无明显退化,即具有良好的保真度。编码和解码过程复杂度低,只需少量存储来记录,从而能够实现实时操作。实现了在压缩比、复杂度、保真度和存储要求之间的平衡,使得这种方法可以用于实时的全息视频系统。

## 2.5 光学切片

最近, Zhang 等<sup>[19]</sup>发展了一种逆成像技术,尝试将全息成像一次扫描获得完整三维信息的优点和切片成像消除离焦模糊的优点结合起来。逆成像算法已经用于实际的实验全息数据,得到了重建图像<sup>[20]</sup>。将  $2\ \mu\text{m}$  荧光颗粒粘在幻灯片的上表面或者盖玻片的底面,形成纵向截面距离为  $35\ \mu\text{m}$  的三维测试样本。利用  $542\ \text{nm}$  激光照射颗粒,产生  $612\ \text{nm}$  的荧光。图 7 显示利用传统方式重建的切片图像,图 8 显示利用逆成像技术重建的切片图像。对比图 7 和图 8 中对应深度切片的重建图像,聚焦切片图像对离焦噪声具有明显的抑制作用。

现有的逆成像技术需要关于目标距离的先验知识来重建理想的切片图像,否则就需要在不同深度进行数字盲重建,直到获得理想的切片图像,这种处理需要花费大量的时间。Kim 等<sup>[21]</sup>提出一种自聚焦技术,用于确定三维目标的距离参数。利用高斯低通滤波合成一个谱全息,它的相位包含距离参数信息,可以利用条纹调制滤波和维格纳分布,从谱全息中提取距离参数,从复数全息中重建目标的三维图像,避免了利用传统的盲卷积来重建图像。

总之,作为一种新颖独特的三维成像技术,OSH 通过二维外差扫描来获得目标的高分辨率三维信息。这一技术具有以下特点:是实时非传统数字全息技术,不需要胶片记录;只需一次完整的二维主动光学扫描,就可以获得目标的三维全息信息;采用外差接收,从接收信号中可以获取正弦和余弦信号,组合产生复数全息,消除全息成像过程中孪生像的干扰。从 OSH 原理和研究进展可以看到,OSH 技术应用范围很广,但信号的同步问题以及复杂的处理电路也使得这一技术的实现要求较高。

## 3 FZP 扫描全息术

梁万国等<sup>[22]</sup>基于 OSH 和编码孔径成像(CAI)<sup>[23]</sup>这两种成像技术的原理,去掉 OSH 技术中的声光调

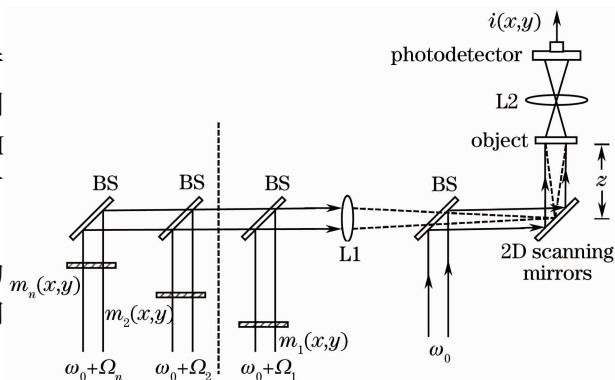


图 6 多光束扫描全息

Fig. 6 Multiple-beam scanning holography

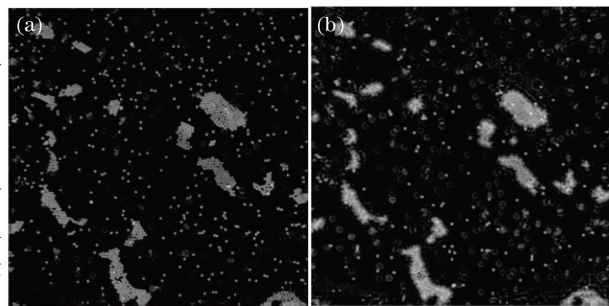


图 7 利用传统方法重建的切片。(a)深度为  $85\ \mu\text{m}$  处的重建切片;(b)深度为  $120\ \mu\text{m}$  处的重建切片

Fig. 7 Sections reconstructed by the conventional method at  $85\ \mu\text{m}$  (a) and  $120\ \mu\text{m}$  (b) from the point source of the scanning beam

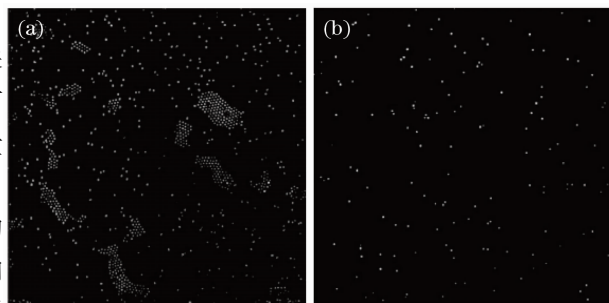


图 8 利用逆成像重建的切片。(a)深度为  $85\ \mu\text{m}$  处的重建切片;(b)深度为  $120\ \mu\text{m}$  处的重建切片

Fig. 8 Sections reconstructed by inverse imaging at  $85\ \mu\text{m}$  (a) and  $120\ \mu\text{m}$  (b) from the point source of the scanning beam

制,利用 FZP 进行投影扫描成像,提出了实用的 FZP 扫描全息术。FZP 扫描全息术是光学和电子学相结合的产物,它光路稳定、结构紧凑,并且有数字图像重建和层析成像等优点。自 1997 年起,先后开展了光学扫描全息术的基本原理分析及仿真、环形光栅光学扫描全息术的基本原理分析及仿真、用 FZP 扫描全息术对散射介质中的吸收体成像等多个方面的研究。

### 3.1 FZP 扫描全息术原理

FZP 扫描全息术的成像过程包括编码和解码两个阶段,成像系统如图 9 所示<sup>[24]</sup>。照明光束经 FZP 编码孔径后在物体上形成投影。利用二维电移台驱动物体做平面扫描。经过光电接收,由 FZP 投影对三维物体的某一断面编码的信号,是物体的该断面强度透射率函数和到达该断面的 FZP 投影的透射率函数的卷积。将各个断面的扫描全息图函数非相干叠加就得到对整个物体的编码记录。

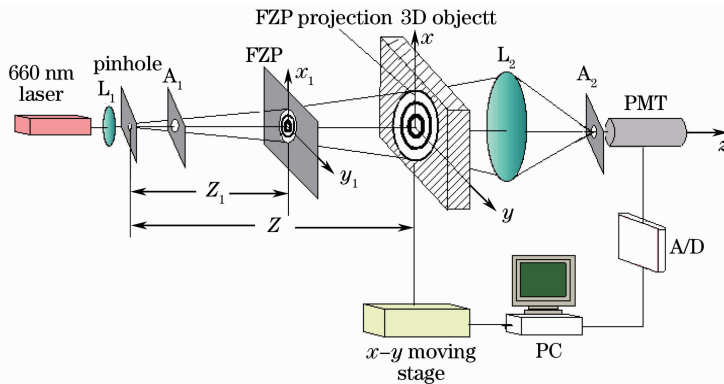


图 9 FZP 扫描全息术原理图

Fig. 9 Schematic of FZP scanning holography

用某一断面的解码函数对物体的扫描全息图解码时,可得到物体该断面清晰的解码像,而其他断面的像变得模糊,成为背景噪声叠加在该断面的解码像上。改变解码函数的纵坐标  $z$  值,即可提取出物体不同断面的层析像。

### 3.2 环形光栅扫描全息术

Liang 等<sup>[25,26]</sup>分析了 OSH 系统的点扩展函数并给出了计算机仿真结果,在此基础上把光学扫描全息术推广到一般情形:如果某一实时的光场强度分布函数包含有  $z$  参量,同时该函数的自相关是  $\delta$  函数,就可以把该光场作为光学扫描全息术中的照明光场。

由于 FZP 条纹中间稀、边缘密,在系统的分辨率相等时,FZP 被抽样的环数较少。为了充分利用系统的分辨率,设计了一种中间和边缘的稠密程度相同的光栅,即环形光栅(CG),如图 10 所示。计算结果表明,相同面积的 FZP 和 CG,当 CG 的条纹间隔等于 FZP 最边缘的条纹间隔时,CG 的自相关特性比 FZP 的自相关特性更接近  $\delta$  函数。对于同样大小的 FZP 和 CG,CG 光学扫描全息系统的分辨率比 FZP 光学扫描全息系统的分辨率好。

### 3.3 高散射介质成像

由于人体组织对波长在 600~1300 nm 的近红外光具有低吸收、高散射的特性,因此考虑利用近红外光光源对人体组织成像,从而快速、准确、安全地发现组织内部病变。需要注意的是,Indebetouw 等<sup>[11]</sup>已经开展了散射介质中的物体成像,但是他们所研究的物体是荧光体,即自发光体,而谢敬辉等<sup>[27]</sup>研究的是吸收体、非发光体,二者表现在系统点扩展函数上是截然不同的。

由于成像对象是模拟血管组织嵌埋在强散射介质中的吸收体,因而所采集的信号中包含了极强的散射背景噪声。针对这一问题,谢敬辉等<sup>[27]</sup>提出应用 FZP 编码孔径的复合扫描全息术,构造用于高散射介质中

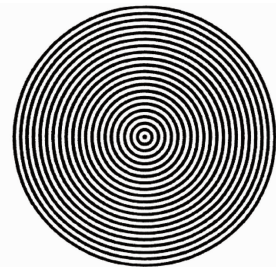


图 10 环形光栅示意图

Fig. 10 Schematic of CG

的吸收体成像的系统点扩展函数,提高重建图像的对比度和信噪比,实验结果见图 11。

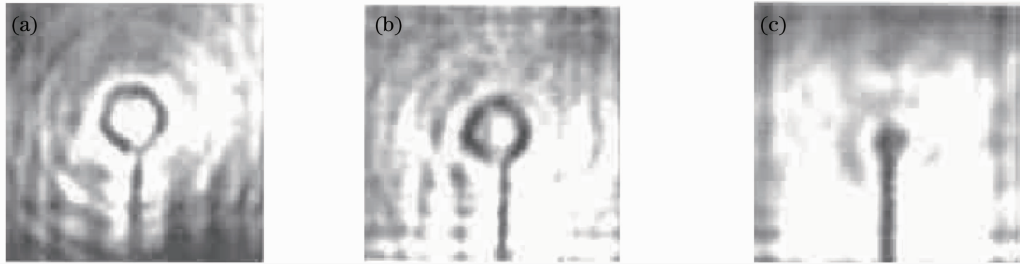


图 11 嵌埋在脂肪乳剂溶液中的吸收体成像实验结果。(a)无脂肪乳剂的金属环的重建图像;(b)嵌埋在质量分数为 1% 脂肪乳剂溶液中的金属环的重建图像;(c)嵌埋在质量分数为 1% 脂肪乳剂溶液中的黑塑料球的重建图像

Fig. 11 Reconstructions of the metal ring and the blackplastic ball. (a) Metal ring without intralipid; (b) metal ring embedded in intralipid; (c) black plastic ball embedded in intralipid

实验结果表明,系统可以对嵌埋在质量分数为 1% 的脂肪乳剂中直径为 0.4 mm 的金属丝以及直径为 6.0 mm 的金属环清晰地成像,也可以对直径为 2.5 mm 的黑塑料球成像。采用复合扫描全息术,成功地实现了高散射介质中的三维吸收体成像。将这种新技术应用于医学成像领域是可能的。

通过进一步增加 FZP 的环数、减小环间距,将最小分辨距离减小到亚毫米量级是完全可能的,即系统可以具有很高的横向分辨率。这样的指标对于生物组织成像具有十分重要的意义。

机械扫描时间的制约是 FZP 扫描全息术实用性的障碍。为此孙萍等<sup>[28]</sup>提出了 FZP 无运动卷积偏振选通全息术,该技术在成像系统结构上做了改进:1)使用扩展光源,用多个 FZP 在物体上的投影叠加形成卷积运算来取代机械扫描;2)用 CCD 取代光电倍增管。另外,为了去掉漫射光给生物组织的再现像所带来的影响,结合偏振选通技术来提高物体全息图再现像的衬比度和信噪比。

采用圆偏振光作为入射光,对嵌埋在质量分数为 1%、深度为 2 cm 的脂肪乳剂溶液中的金属丝(直径 0.4 mm)进行了成像实验,如图 12 所示。结果表明,FZP 无运动卷积偏振选通全息术是可行的。

FZP 无运动卷积技术信号采集速度快,采用 CCD 摄像机没有时间消耗,快捷、灵活,能满足现代医疗普查仪器的要求。但是,这种成像系统存在空间光调制器的多级衍射光,成像质量受到影响。

最近,孙萍等<sup>[29]</sup>对 FZP 的衍射问题进行了研究。造成编码图形畸变的主要因素为:FZP 对入射光的衍射作用使得 FZP 的投影偏离理想的 FZP 光强分布。对可能带来衍射效应的系统参数,包括透镜焦距  $f$ 、波带板环数  $N$  和半径  $R$ ,进行了理论分析和实验研究。

通过以上原理和进展的描述,可以总结出 FZP 扫描全息术具有以下特点:1)FZP 编码孔径可用照相干板制作,而不必采用双光束干涉实时产生;2)编码孔径不仅限于 FZP,还可以是其他类型的编码孔径;3)系统结构紧凑,应用性强,相比 OSH 更易实现。该技术在生物医学成像领域里具有潜在的应用前景。

#### 4 菲涅耳望远镜

结合 OSH 和傅里叶望远镜<sup>[30]</sup>技术,研究人员提出了一种菲涅耳望远镜成像技术<sup>[31,32]</sup>,其原理是对于目标投射一个由两个同轴同心偏振正交的球面波组成的扫描光斑。有两种工作模式,第一种用于运动目标,这时光束做一维扫描;第二种用于静止目标,这时光束做二维扫描。目标与照明光斑的相互二维扫描将每个目标点的回波转化为时间流信号,接收端采用同轴相干接收,同时将物体点编码成一个二维菲涅耳波带结构的复数二次项相位分布,最终通过处理器的匹配滤波重构出物体图像。菲涅耳望远镜成像系统结构如图 13 所示。

在一维扫描模式中,目标的扫描轨迹如图 14 所示。目标和光束扫描相互运动产生的目标点的空间采样

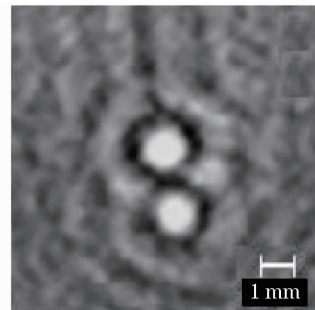


图 12 重建的目标图像

Fig. 12 Reconstructed image of the object

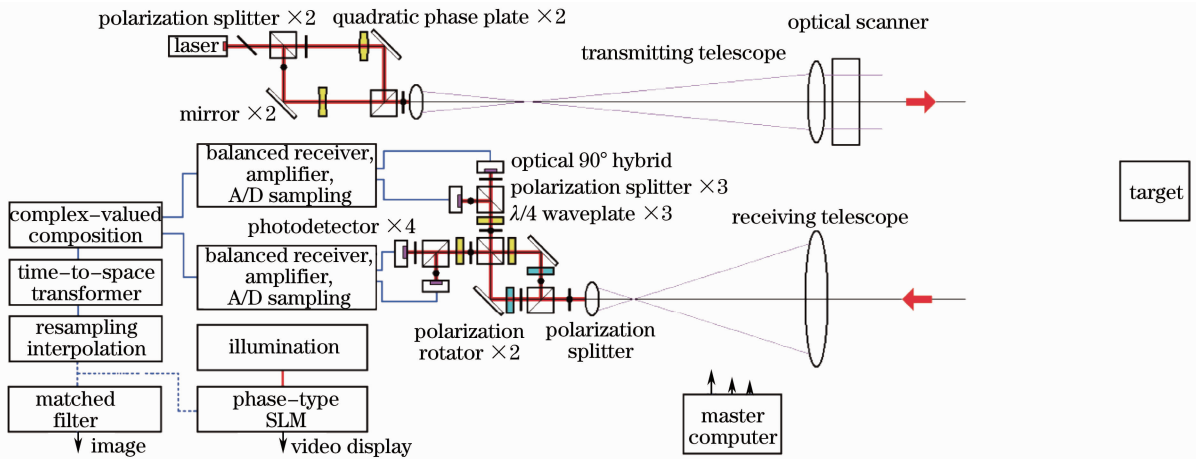


图 13 菲涅耳望远镜的原理图

Fig. 13 Schematic diagram of Fresnel telescope

是非正交非均匀分布的,因此需要利用重采样插值方法将其转化为正交坐标规则采样的数据,最后通过相位匹配滤波得到物体的输出图像。

作为一种基于全孔径合成工作原理的激光雷达,菲涅耳望远镜有如下明显特点:能够实现目标的超光学分辨率极限的高分辨率二维成像;具备高接收灵敏度和高成像信噪比的特性,并大大降低了大气对于激光传输的影响;光机械结构和电子设备简单。

总之,菲涅耳望远镜是一种能够有效克服大气湍流影响的高分辨率成像技术。而两种不同的工作模式,也使得这一技术具有更广泛的应用范围。

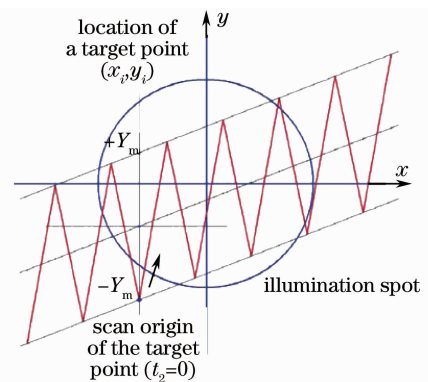


图 14 目标点对于照明光斑的扫描轨迹  
Fig. 14 Scanning locus of a target point on illumination spot

## 5 结 论

讨论了基于 FZP 扫描的光学成像技术,包括 OSH、FZP 扫描全息术、菲涅耳望远镜等,对这几种技术的原理、结构、特点和研究进展进行了论述和分析,给出了基于 FZP 扫描的几种成像方式的特点。作为一种新颖的三维成像技术,FZP 扫描成像的原理和方法可以从可见光波段扩展到红外、X 射线以及声波领域。而 FZP 扫描成像所具有的一次二维扫描实现三维成像、接收复数信号消除全息孪生像、根据需要产生不同 FZP 形式、可以多频率复用的能力、可以用于透射和反射目标的灵活性,都使这一技术在军事、生物、医学领域具有巨大的发展潜力及广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999
- 2 Bao Zheng, Xing Mengdao, Wang Tong. Radar Imaging Technology[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005  
保 铮, 邢孟道, 王 彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005
- 3 S. M. Beck, J. R. Buck, W. F. Buell *et al.*. Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(35): 7621~7629
- 4 Peng Renjun, Wu Jian, Yang Chunping *et al.*. Synthesizing aperture in optics with interferometric imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 355~359  
彭仁军, 吴 健, 杨春平等. 用干涉法实现光学合成孔径技术[J]. *光学学报*, 2002, **22**(3): 355~359
- 5 T.-C. Poon, A. Korpel. Optical transfer function of an acousto-optic heterodyning image processor[J]. *Opt. Lett.*, 1979, **4**(10): 317~319
- 6 T.-C. Poon. Scanning holography and two-dimensional image processing by acousto-optic two-pupil synthesis[J]. *J. Opt.*

- Soc. Am. A*, 1985, **2**(4): 521~527
- 7 B. D. Duncan, T.-C. Poon. Gaussian beam analysis of optical scanning holography[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1992, **9**(2): 229~236
- 8 T.-C. Poon. Optical Scanning Holography with Matlab[M]. New York: Springer, 2007
- 9 Guy Indebetouw, Yoshitaka Tada, John Leacock. Quantitative phase imaging with scanning holographic microscopy; an experimental assessment[J]. *BioMedical Engineering OnLine*, 2006, **5**(1): 63
- 10 G. Indebetouw, T. Kim, T.-C. Poon *et al.*. Three-dimensional location of fluorescent inhomogeneities in turbid media by scanning heterodyne holography[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(2): 135~137
- 11 Guy Indebetouw, Wenwei Zhong. Scanning holographic microscopy of three-dimensional fluorescent specimens[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2006, **23**(7): 1699~1707
- 12 T. Kim, T.-C. Poon. Extraction of 3D location of matched 3D object using power fringe-adjusted filtering and wigner analysis[J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(12): 2176~2183
- 13 Bradley W. Schilling, Glen C. Templeton. Three-dimensional remote sensing by optical scanning holography[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(30): 5474~5481
- 14 D.-J. Park. Three-Dimensional Display of a Realistic Object[D]. Seoul: Sejong University, 2004
- 15 Ting-Chung Poon. Optical scanning holography—a review of recent progress[J]. *J. Opt. Soc. Korea*, 2009, **13**(4): 406~415
- 16 T.-C. Poon. Three-dimensional television using optical scanning holography[J]. *J. Inform. Display*, 2002, **3**(3): 12~16
- 17 Ting-Chung Poon, Ming Hsien Wu, Kazunori Shinoda *et al.*. Optical scanning holography[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1995, **84**(5): 753~764
- 18 Peter Tsang, Wai Keung Cheung, Taegun Kim *et al.*. Low-complexity compression of holograms based on delta modulation[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(8): 2113~2117
- 19 Xin Zhang, Edmund Y. Lam, Ting-Chung Poon. Reconstruction of sectional images in holography using inverse imaging [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(22): 17215~17226
- 20 Edmund Y. Lam, Xin Zhang, Huy Vo *et al.*. Three-dimensional microscopy and sectional image reconstruction using optical scanning holography[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(34): H113~H119
- 21 T. Kim, T.-C. Poon. Autofocusing in optical scanning holography[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(34): H153~H159
- 22 Liang Wanguo, Yuan Nairong, Xie Jinghui *et al.*. Optical scanning holography and the numerical simulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(9): 847~851  
梁万国, 袁乃荣, 谢敬辉 等. 光学扫描全息术及其计算机仿真[J]. 中国激光, 1998, **A25**(9): 847~851
- 23 E. E. Fenimore, T. M. Cannon. Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(3): 337~347
- 24 Sun Ping, Xie Jinghui, Zhou Yuanlin. Optical tomography based on Fresnel zone plate scanning holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 110~114  
孙萍, 谢敬辉, 周元林. 基于菲涅耳波带板扫描全息术的光学层析成像[J]. 光学学报, 2004, **24**(1): 110~114
- 25 W.-G. Liang, S.-Y. Liu, J.-H. Xie. Circular grating optical scanning holography[C]. *SPIE*, 2000, **3951**: 54~60
- 26 Liang Wanguo, Zhao Dazun, Xie Jinghui *et al.*. Circular grating optical scanning holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1): 74~77  
梁万国, 赵达尊, 谢敬辉 等. 环形光栅光学扫描全息术的研究[J]. 光学学报, 2000, **20**(1): 74~77
- 27 Xie Jinghui, Sun Ping, Li Wen *et al.*. Composite scanning holography and 3D imaging through highly scattering media[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 742~745  
谢敬辉, 孙萍, 李闻 等. 复合扫描全息术及透过强散射介质三维成像研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(5): 742~745
- 28 Ping Sun, Xiao L. Mo, Jing H. Xie. Polarization-based digital holography of Fresnel-zone-plate convolution without motion [C]. *SPIE*, 2007, **6832**: 68321M
- 29 Sun Ping, Wang Yu, Mo Xiaoli *et al.*. Fresnel-zone-plate diffraction in scanning holography[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(5): 1001~1007  
孙萍, 王瑜, 莫晓丽 等. 扫描全息术中菲涅耳波带板的衍射问题[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(5): 1001~1007
- 30 R. B. Holmes, S. Ma, A. Bhowmik *et al.*. Aperture-synthesis techniques that use very-low-power illumination[C]. *SPIE*, 1995, **2566**: 177~185
- 31 Liu Liren, Fresnel telescope full-aperture synthesized imaging lidar: principle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 012800  
刘立人. 菲涅耳望远镜全孔径合成成像激光雷达: 原理[J]. 光学学报, 2011, **31**(1): 012800
- 32 Xiaoyu Lü, Liren Liu, Aimin Yan *et al.*. Imaging system of Fresnel telescope[C]. *SPIE*, 2010, **7818**: 78180Z