

相干场成像原理局限性分析

司庆丹¹⁾²⁾ 罗秀娟^{1)†} 曾志红¹⁾²⁾

1)(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2014年1月5日收到; 2014年1月20日收到修改稿)

研究了相干场成像技术(又称傅里叶望远术)的基本原理,从理论上分析其局限性,明确定义测量对象并通过曲面积分推导成像过程中的数学关系.结果表明,该技术的重建图像中含测量对象表面的梯度信息,其对物体表面反射率分布的测量是不准确的,并进行了计算机仿真实验验证.这为评估该技术成像结果和进一步发展相干场三维成像提供借鉴.

关键词: 相干场成像, 傅里叶望远术, 曲面积分, 反射率**PACS:** 42.25.Kb, 42.30.Kq, 07.07.Df**DOI:** 10.7498/aps.63.104203

1 引言

相干场成像技术通过获取物体表面反射率函数的频谱信息实现对物体的间接成像,是物理学和信息学共同发展的结果. Sica^[1]于1991年提出了相干场成像技术基本的系统结构模型及数据处理算法.之后Holmes等^[2]进一步发展完善了该技术,并于1996年系统完整地提出傅里叶望远术的概念并进行了仿真,至此相干场成像技术的原理基本定型.

望远镜角分辨率与镜筒口径大小成反比,受技术及成本限制,传统望远镜口径有限,且无法消除大气湍流影响,分辨率大约在一个角秒.自适应光学通过波前相位校正降低湍流影响,使得望远镜分辨率接近衍射极限,大约为60微角秒,但其结构复杂,成本较高.长基线干涉仪极大地提高了望远镜分辨率,将自适应光学所能达到的分辨率提高了两个数量级,大约在0.2微角秒,但长基线干涉仪是被动成像,且接收端的分布式接收器要求每个孔径尺度小于大气相干长度,从而使得接收面积小,接收信号有限,信噪比很低^[2],对暗弱目标难以成像.相干场成像是主动式成像技术,在发射端使用

分布式激光器,光束在待测物体表面形成干涉,接收端只需收集回波的能量而无需相位信息,故可使用大面积低质量光电元件完成接收,极大地提高了信噪比,同时又可以使用相位闭合消除大气湍流影响^[3-7].因此相干场成像既可以达到或优于长基线干涉仪的分辨率,又克服了其接收能量弱的缺点,从而可实现对远距离暗弱目标的高分辨率成像.当今航空航天技术蓬勃发展,相干场成像技术在深空探测领域具有应用潜力,进而推动其在世界范围内得到了广泛的研究.自相干场成像原理提出后,相关研究主要集中在室内验证和外场缩比演示系统的实验上,以及与这些实验相关的各类具体问题的理论探讨上^[8-10].鲜见对该成像技术的基本原理的进一步研究.

视觉是人类认识世界的主要渠道,人眼观察物体时,获取的视觉图像是物体对不同波段可见光的反射形成的.相干场成像的目的也是通过获得目标表面反射率分布函数来获取物体的图像.对该技术成像基本原理研究后发现,成像结果是反射率和梯度信息的乘积,故相干场成像系统并不能准确测得物体反射率分布.本文对此结论进行了详细阐述,首先给出测量对象的定义,然后推导出成像结果,并通过计算机仿真进行验证,最后尝试提出一个突

† 通讯作者. E-mail: xj_luo@opt.ac.cn

破相干场成像局限性的思路.

2 对相干场成像基本理论的研究

首先描述成像的基本过程. 相干场成像系统由发射器和接收器构成. 发射器包括激光器、跟踪系统以及发射阵列等; 接收器由定日镜、聚光镜、光电探测器、信号采集处理硬件和图像重构软件组成. 发射阵列常见的结构有“T”型、“Y”型和“O”型, 具体使用哪种结构对于阐述成像基本原理并无影响, 不失一般性, 以下均以“T”型阵列为例. 发射阵列上分布多个发射孔径, 每次同时由三个或三个以上的孔径发射相干光照射物体, 各光束间互有微小频移, 形成随时间移动的干涉条纹扫描物体, 被物体反射的光强随时间变化. 反射回波信号中含物体反射率分布函数的频谱信息, 频谱信息在时间域被编码, 回波信号被光电探测器接收, 再导入计算机或专门的信号处理器件, 利用相应的信号处理算法求解出反射率函数的频谱分量, 然后相位闭合消除频谱分量中的相位误差, 最后经逆傅里叶变换获得物体图像.

以上成像过程可利用信息学中的观点描述: 物体反射率分布函数的频谱信息是被传输的对象, 即调制信号; 两光束间因互有频移而形成时域正弦信号, 即载波信号; 光束照射到目标, 反射回波即为调制后的信号. 设置不同光束间的频差互不相同, 形成的载波信号频率各不相同, 因此可通过解调将回波信号携带的频谱分量分离出来.

由上述成像过程可知, 相干场成像系统获取物体信息要满足以下两个条件: 首先要使调制信号能加载到载波上, 即物体可被激光照射到; 其次要使调制后的信号被接收到, 即反射回波可被采集到. 据此给出测量对象的定义. 设发射阵列所在面为 x - y 坐标轴面, 目标总在 z 轴正方向, 根据右手准则建立三维坐标. 为计算方便, 可选择“T”型发射阵列两臂分别位于 x , y 轴上, 两臂交点设为原点, 如图 1 所示.

定义: 设 $f(\mathbf{x})$ 为物体反射率分布函数, Ω 为物体表面所形成的曲面. $f(\mathbf{x})$ 称为测量对象, 其定义域 Ω 满足以下两个条件:

条件 1 上行链路: Ω 上每一点都可被激光发射阵列照射到;

条件 2 下行链路: Ω 上每一点反射的回波都可被光电探测器接收到.

若成像系统满足条件 1, 但实际中受接收器规模、目标曲面和接收器相对位置的限制, 一般不能满足条件 2, 则光电探测器只能采集到物体部分表面的反射回波, 最终成像也只能表示这一部分的信息. 如果待测物体的空间尺寸大于干涉场所能覆盖的范围, 即只是物体的一部分满足条件 1, 从而测量对象仅是待测物体的一部分. 干涉场范围大于目标尺寸, 若背景也被干涉场覆盖且返回信号被探测器采集到, 实际测量对象是由待测物体和背景共同形成. 可见, 条件 1 和条件 2 共同决定了实际的测量对象.

条件 1 要求激光束可以照射到测量对象表面上, 被照射到的每一点和激光器之间应“无遮挡”, 即 Ω 所表示的空间曲面是发射阵列坐标面上点 (x, y) 的单值函数, 可表示为 $z = z(x, y)$. 设 Σ 为 Ω 在发射坐标面的投影, 则测量对象 $f(\mathbf{x})$ 本质上是定义在 Σ 上的二元函数, 故也可称为测量图像.

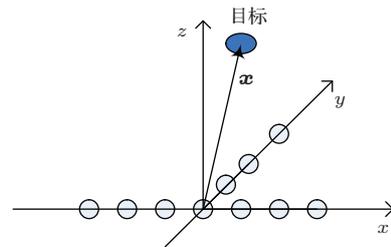


图 1 成像系统坐标系

待测物体结构各异, 其外表面不一定满足可微分条件, 而是由可微的多片曲面组成. 光电探测器所采集信号为反射光强沿测量对象整个曲面的积分. 由微积分知识可知, 积分结果对于积分区域具有可加性, 因此可先分别求各曲面片上的积分然后叠加. 不失一般性, 设曲面为单片可微, 对两个坐标的偏导分别为

$$z_x = \frac{\partial}{\partial x} z(x, y), \quad z_y = \frac{\partial}{\partial y} z(x, y).$$

为研究成像基本原理, 排除实际系统中的各项影响, 假设成像条件是理想的: 激光发射阵列各孔径出射光束相干且光强相等, 上行链路和下行链路中光强没有衰减或衰减系数为常数.

每次由三束或三束以上互有频移的激光同时照射物体, 取其中任意两束光说明载波的形成, 设两束光的幅值相等, 均为 1, 频率分别为 ω_1, ω_2 , 波矢分别为 $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2$, 各种影响因素造成的相位误差分别为 ϕ_1, ϕ_2 . 两束光在测量对象表面形成的干涉场

的光强, 即载波的幅值, 与下式成正比:

$$c(\mathbf{x}, t) = 2 + \exp(i\omega_{12}t + i\mathbf{k}_{12} \cdot \mathbf{x} + i\varphi_{12}) + \text{c.c.}, \quad (1)$$

其中, c.c. 表示前一个和项的共轭复数,

$$\omega_{12} = \omega_1 - \omega_2, \quad \mathbf{k}_{12} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2, \quad \varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2.$$

可见载波是以两相干光束间差频为时间频率的正弦波, 其被反射率分布函数调制后, 反射到光电探测器, 回波光强与下式成正比:

$$\begin{aligned} M(t) &= \iint_{\Omega} f(\mathbf{x})c(\mathbf{x}, t) d\sigma \\ &= \iint_{\Omega} f(\mathbf{x})[2 + \exp(i\omega_{12}t + i\mathbf{k}_{12} \cdot \mathbf{x} + i\varphi_{12}) + \text{c.c.}] d\sigma, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, 积分区间 Ω 为空间三维曲面, $d\sigma$ 为曲面面元. 回波中含有 $f(\mathbf{x})$ 信息, 是成像系统期望获得的测量图像. 需判断成像系统能否准确获得 $f(\mathbf{x})$ 的值. 下面的分析指出, 相干场成像系统对于测量对象的反射率函数 $f(\mathbf{x})$ 的测量是不准确的.

利用曲面积分公式^[11], 对 (2) 式进一步推导:

$$\begin{aligned} M(t) &= \iint_{\Sigma} f(\mathbf{x})[2 + \exp(i\omega_{12}t + i\mathbf{k}_{12} \cdot \mathbf{x} + i\varphi_{12}) + \text{c.c.}] \sqrt{1 + z_x^2 + z_y^2} dx dy \\ &= \iint_{\Sigma} f_1(\mathbf{x})[2 + \exp(i\omega_{12}t + i\mathbf{k}_{12} \cdot \mathbf{x} + i\varphi_{12}) + \text{c.c.}] dx dy \\ &= 2F(0) + F(-\mathbf{k}_{12}) \exp(i\omega_{12}t + i\varphi_{12}) + \text{c.c.}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $F(\cdot)$ 表示 $f_1(\cdot)$ 的傅里叶变换,

$$f_1(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) \sqrt{1 + z_x^2 + z_y^2}. \quad (4)$$

利用数据采集卡采集光电探测器输出的电信号, 对采集数据进行解调和相位闭合后获得频谱分量 $F(\cdot)$, 然后利用傅里叶逆变换重建图像. 由 (3) 式可知, 求解出的频谱分量 $F(\cdot)$ 并非是 $f(\cdot)$ 的傅里叶分量, 而是 $f_1(\cdot)$ 的傅里叶分量, 所以对 $F(\cdot)$ 逆变换所得图像为 $f_1(\cdot)$, 即重建图像是反射率函数和测量对象曲面梯度信息的乘积.

3 仿真实验及分析

为排除实际系统中各种因素对成像结果的影响, 验证上述相干场成像技术的原理性局限, 仿真中假设成像条件是理想的.

待测物体表面为空间三维曲面, 如图 2 所示. 曲面下侧被激光照射到的部分为测量对象, 设其梯度只沿 y 轴方向变化, 且梯度值由测量对象中间向两侧递增. 为直观显示曲面的这种结构特点, 画出曲面在 y - z 坐标面的投影, 结果如图 3 所示.

测量对象 $f(\mathbf{x})$ 呈黑白块相间的棋盘式分布, 如图 4 所示, 这是系统期望获得的图像.

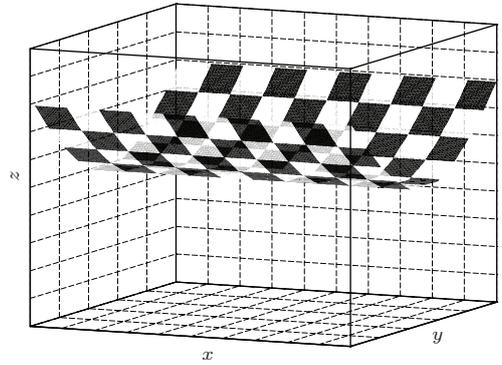


图2 测量对象

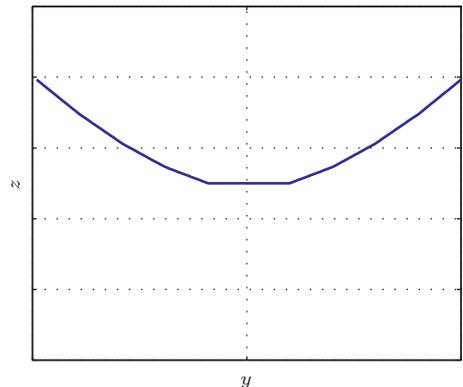


图3 测量曲面在 y - z 面的投影曲线

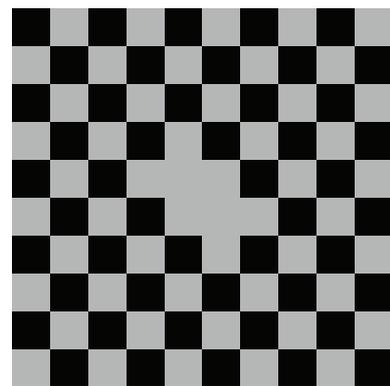


图4 期望获取的图像

激光发射阵列使用等臂长等间隔的“T”型结构, 阵列规模大小为 $N \times N$, 分别使 $N = 5, 6, \dots, 30$, 获得了 26 幅重建图像, 图 5 列出了其中四幅.

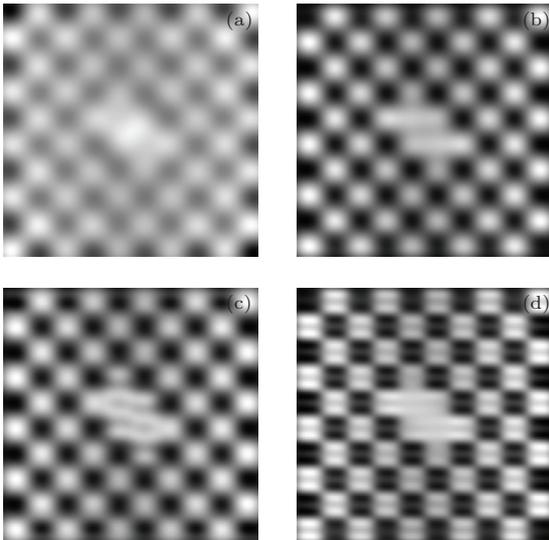


图5 $N \times N$ 发射阵列所获得的图像 (a) $N = 5$; (b) $N = 10$; (c) $N = 15$; (d) $N = 25$

斯特列尔比可用来度量两幅图像的相似度. 给定离散图像 $f_m(\mathbf{x})$, $f_n(\mathbf{x})$, 斯特列尔比 S 定义为

$$S(f_m, f_n) = \frac{|\langle f_m(\mathbf{x}), f_n(\mathbf{x}) \rangle|^2}{\sum |f_m(\mathbf{x})|^2 \times \sum |f_n(\mathbf{x})|^2}, \quad (5)$$

其中 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示内积, 两幅图像越相似, 斯特列尔比越接近 1, 当两者强度值相等或只相差一个常数因子时, 斯特列尔比为 1.

设相干场成像系统重建图像为 f_r , 为度量 f_r 与测量对象 f 间的相似度, 令

$$s = S(f_r, f).$$

分别计算不同发射阵列规模的重建图像 f_r 与期望获取的图像 f 间的斯特列尔比值 s .

由于测量曲面是三维曲面, 曲面上各点梯度值不同, 含梯度信息的图像 $f_1(\mathbf{x})$ 如图 6 所示, 图像的强度值大体上沿 y 轴方向变化 (图像左上角为坐标原点), 结合图 3 可知, 其变化趋势与曲面梯度值变化趋势一致.

为度量系统重建图像与 $f_1(\mathbf{x})$ 的相似度, 令 f_r 与含梯度信息的图像 f_1 间的斯特列尔比值 s_1 为

$$s_1 = S(f_r, f_1).$$

分别计算不同发射阵列规模的重建图像 f_r 与含梯度信息的图像 f_1 间的斯特列尔比值 s_1 .

为方便对比, 将 s, s_1 计算结果图形化显示, 结果如图 7 所示. 对比可知, 测量结果与 f_1 的斯特列尔比更大, 即 f_1 是系统的实际测量结果, 从而验证了上面的结论, 即重建图像是反射率函数和测量对象曲面梯度信息的乘积.

自相干场成像技术的原理提出后, 很多学者对此进行了研究, 并利用计算机仿真或在室内、室外实验验证了成像原理的可行性. 成像原理的局限性却未见诸报道, 分析其原因大致有以下两方面.

首先, 进行室内或室外实验时, 系统受到各种因素影响, 实验成像结果总是与期望图像存在误差. 如每束激光束功率相同, 对发射阵列激光器分光系统要求很高; 每束光光斑中心都与测量对象中心重合, 要求跟踪系统和控制系统的精度非常高; 光电探测器接收到测量对象反射曲面上每一点的反射回波, 要求接收阵列面积足够大等等. 因为成本和技术的因素, 以上各要求在实际系统中很难实现. 假如某种精度的系统搭建成功后, 也会受到各种复杂多变的噪声的影响, 如大气条件、环境温度、电子器件的热噪声等. 所以, 实际系统的成像结果总是与期待图像存在误差, 很难分辨是由于成像原理本身的缺陷还是噪声造成的.

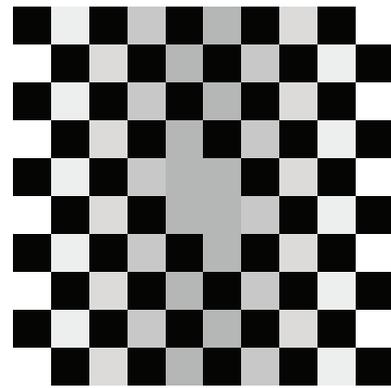


图6 含梯度信息的图像

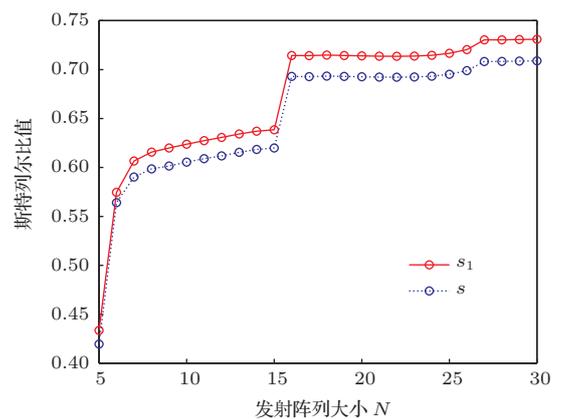


图7 基于不同规模的发射阵列计算得到的 s, s_1

第二个原因也是最主要的原因: 测量对象的选择. 对历年相关文献报道的研究发现, 实验和仿真中所用测量对象是二维平面, 根据平面的数学模型可知, z_x, z_y 都是常数, 若目标平面垂直于发射阵列

则其值为零,

$$f_1(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x})\sqrt{1 + z_x^2 + z_y^2} = c_0 f(\mathbf{x}), \quad (6)$$

其中

$$c_0 = \sqrt{1 + z_x^2 + z_y^2},$$

在平面上为一常数.

若一幅图像每一点的强度具有相同比例的缩放, 结果对图像处理和显示是没有影响的. 由(6)式可知, 目标曲面是平面时, 梯度信息为常数, 对成像结果没有影响, 实验结果规避了成像原理的局限性.

相干场成像系统的测量结果虽不准确, 在精度要求不高或者测量对象表面起伏不大的情况下, 仍可作为有效的观测手段. 若测量对象反射率函数已知, 相干场成像可用于测量物体的空间形状信息, 如可人为对物体“染色”, 使其表面反射率均匀为某一常数, 进而可测得物体表面的梯度场分布.

相干场成像技术的局限性是由于将空间三维信息降为平面二维信息所产生的, 降维表示使曲面的梯度信息附加在反射率强度上. 为突破这种局限性, 尝试用物体对两个波段光的反射率比值代替对一个波段光的反射率来表征物体.

科学研究中, 常通过物体对某种外力的作用来实现对物体本身的理解和认识. 对同一物体, 可以在不同角度, 利用不同的量化表征来认知. 某波段的光束照射在物体上, 物体对光波产生反射作用, 反射率是物体对光波作用的量化表征, 相干场成像系统通过测量反射率实现对物体的认知. 将这种量化形式简单推广, 分别使用两个波长为 λ_1, λ_2 的光束照射物体, 获得物体对两个波段的反射率分布函数 $f(\mathbf{x}, \lambda_1), f(\mathbf{x}, \lambda_2)$, 通过 $r_f(\mathbf{x}, \lambda_1, \lambda_2) = f(\mathbf{x}, \lambda_1)/f(\mathbf{x}, \lambda_2)$ 来表征物体.

物体外形一般比较稳定, 使用不同波长照射时, 曲面梯度信息不变, 反射率分布函数改变, 由(4)式可知, 反射率比值可消去梯度信息的影响, 即

$$\begin{aligned} r_f(\mathbf{x}, \lambda_1, \lambda_2) &= f(\mathbf{x}, \lambda_1)/f(\mathbf{x}, \lambda_2) \\ &= f_1(\mathbf{x}, \lambda_1)/f_1(\mathbf{x}, \lambda_2). \end{aligned}$$

实际获取图像相比的结果和期望获取图像相比的结果一致, 也不受梯度信息的影响.

获取物体反射率比值所依赖的基本成像原理不变. 接收器不变, 仍可使用大规模低质量的光电探测元件采集回波信号, 保持了相干场成像技术对远距离或暗弱目标的成像能力. 发射阵列不变, 成像系统的分辨率由光学传递函数决定, 光学传递函

数由发射阵列和激光波长决定, 选择合适的激光, 仍可保持相干场成像系统的高分辨率^[12]. 只需切换激光器波长、对后期算法稍做调整即可. 此处只是提出一种思路, 使用反射率比值表征物体不太符合直观概念, 且如何选择光的波段、如何实现不同波段激光的切换, 涉及很多的理论和工程问题, 尚需深入研究.

4 结 论

本文重新研究了相干场成像的基本原理. 按照测量对象表面为空间三维曲面的一般情况, 对成像基本公式进行了推导. 结论表明, 相干场成像系统的测量结果包含测量对象曲面的梯度信息, 所获得频谱分量不能准确反映被测对象反射率分布函数, 导致恢复出的图像存在误差. 计算机仿真验证了结论的正确性. 因测量结果中含梯度信息, 反映了物体外形的变化, 从而为三维相干场成像技术的研究提供了可能. 最后尝试提出使用反射率比值来表征物体, 消除梯度信息的影响.

参考文献

- [1] Sica L 1991 *Appl. Opt.* **30** 206
- [2] Holmes R B, Ma S, Bhowmik A, Greninger C 1996 *J. Opt. Soc. Am. A* **13** 351
- [3] Liu Y Y, Lü Q B, Zhang W X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 124201 (in Chinese) [刘扬扬, 吕群波, 张文喜 2012 物理学报 **61** 124201]
- [4] Chun X X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 029201
- [5] Li B, Tan Z W, Zhang X X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084204 (in Chinese) [李博, 谭中伟, 张晓兴 2011 物理学报 **60** 084204]
- [6] Ji X L, Pu Z C 2011 *Chin. Phys. B* **20** 014207
- [7] Chun X X, Liu Z J, Wu Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 094201
- [8] Cuellar E L, Stapp J, Cooper J 2005 *Proc. SPIE* **5896** 58960D
- [9] Luo X J, Ma C W, Zhang Y, Si Q D 2011 *J. SCU Sci. Eng.* **28** 325 (in Chinese) [罗秀娟, 马彩文, 张羽, 司庆丹 2011 深圳大学学报理工版 **28** 325]
- [10] Xiang L B, Zhang W X, Wu Z, Lü X Y, Li Y, Zhou Z S, Kong X X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 224201 (in Chinese) [相里斌, 张文喜, 伍洲, 吕笑宇, 李扬, 周志盛, 孔新新 2013 物理学报 **62** 224201]
- [11] Cheng J X, Yu C H, Jin L 2004 *Mathematical Analysis* (Vol. 2) (Beijing: Higher Education Press) p305 (in Chinese) [陈纪修, 於崇华, 金路 2004 数学分析第二版(下册) (北京: 高等教育出版社) 第305页]
- [12] Zhang W X, Xiang L B, Kong X X, Li Y, Wu Z, Zhou Z S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 164203 (in Chinese) [张文喜, 相里斌, 孔新新, 李扬, 伍洲, 周志胜 2013 物理学报 **62** 164203]

Analyses on limitations of coherent field imaging principle

Si Qing-Dan¹⁾²⁾ Luo Xiu-Juan^{1)†} Zeng Zhi-Hong¹⁾²⁾

1) (*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

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

(Received 5 January 2014; revised manuscript received 20 January 2014)

Abstract

The theoretical basis of coherent field imaging technique (also called the Fourier telescopy) is reconsidered. The limitations of the technique principle are analyzed by defining the measured object and deriving rigorously mathematical expressions. The reconstructed image of the technique ineluctably contains the gradient information about the object; as a result the technique cannot acquire the reflectivity of the object exactly. The computer simulation verifies the conclusion. Based on the conclusion, the reconstructed image of the technique can be evaluated and three-dimensional coherent field imaging technique may be developed.

Keywords: coherent field imaging, Fourier telescopy, surface integral, reflectivity

PACS: 42.25.Kb, 42.30.Kq, 07.07.Df

DOI: [10.7498/aps.63.104203](https://doi.org/10.7498/aps.63.104203)

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