
面向复杂光场的计算波前传感

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41852.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

导读

波前传感（Wavefront sensing）能够测量一束光的形貌，即光的振幅和相位的空间分布，其应用广泛，覆盖了光束分析表征等基础研究、光学精密检测等工业应用，以及光场调控等学术前沿领域。

常见的波前传感技术包括两大类：夏克-哈特曼波前传感器等能够实现无参考测量，但难以表征一些复杂拓扑结构；干涉法可以准确测量波前信息，但需要额外的参考光路。

近日，研究人员提出了一种面向复杂光场的计算波前传感器，利用计算成像方法，仅需单次曝光，测量波前维度数可达到 700×700 ，空间模式数可达到192000。

相关研究成果以Single-shot, reference-less computational wavefront sensing for complex optical fields为题发表于Light: Science Applications。香港城市大学蔡定平教授和清华大学曹良才教授为共同通讯作者，博士生高云晖为论文第一作者。

一、计算波前传感器的设计

计算波前传感器的整体结构高度集成化，由一个图像传感器芯片和一个放置于其前方几毫米处的光学编码元件构成，能够满足即插即用的应用需求。

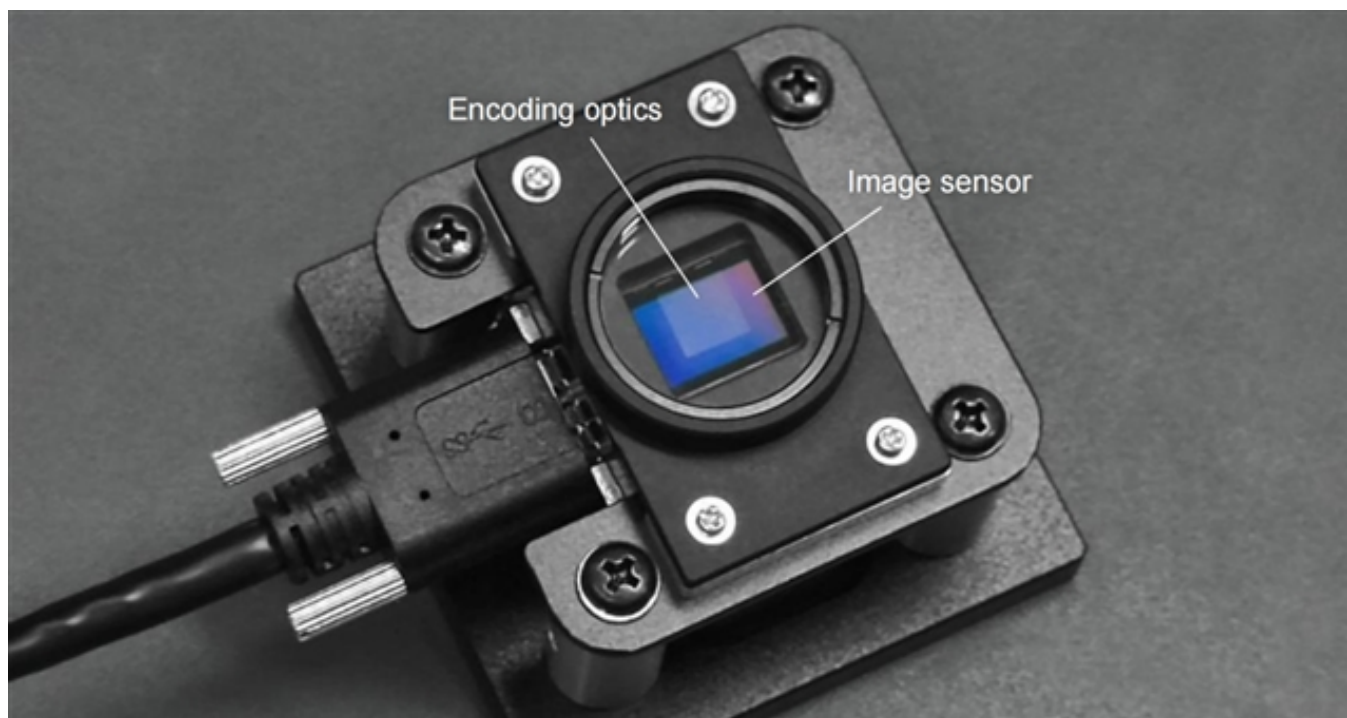


图1：计算波前传感器实物

光学编码元件是计算波前传感器的核心组件，表面有特殊设计和加工的微结构，能够对光波产生随机调制，将原本不可见的相位信息，转化为可直接测量的光强信号。其透过率和相对位置等参数都经过了精确的原位标定，可以准确地建模。

由于光学编码元件的随机调制，图像传感器采集的原始图像类似于散斑图样。虽然直观上看似杂乱无序，但它实际上隐含了波前的振幅与相位信息。从光学记忆效应的角度理解，观测图像整体的强度包络反映了入射波前的振幅分布特性，而散斑的横向位移则揭示了波前局部的相位梯度信息。

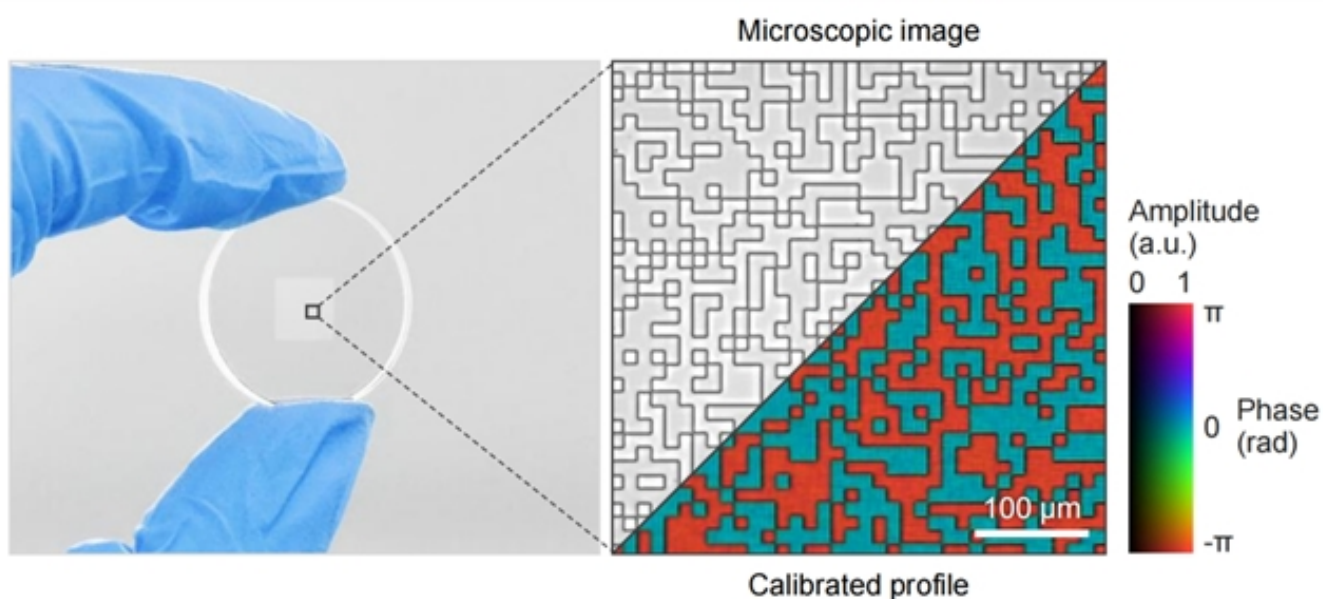


图2：光学编码元件实物及其明场/全息显微图像

二、波前反演算法 SAFARI

如何从单帧图像反演波前信息？这在数学上是一个极具挑战的病态问题。为此，作者提出了空频域正则化反演方法（SAFARI），通过挖掘波前所固有的先验特征，将一个原本不可解的数学问题变得可解。

波前通常在空间域具有平滑分布特性，在空间频率域表现出带限特征。SAFARI在优化目标函数中引入了相应的正则化项，以施加先验约束，从而改善波前重建逆问题的病态性。其中，空间域正则化项 α 和 β 作为软低通滤波器，促进振幅和复振幅分布中的低频成分，通过增加平滑性来优化波前重建质量；而空间频率域正则化项 γ 作为硬低通滤波器，抑制了所有大于截止频率的频谱分量，能够约束解空间的维度，尤其适用于处理复杂波前。

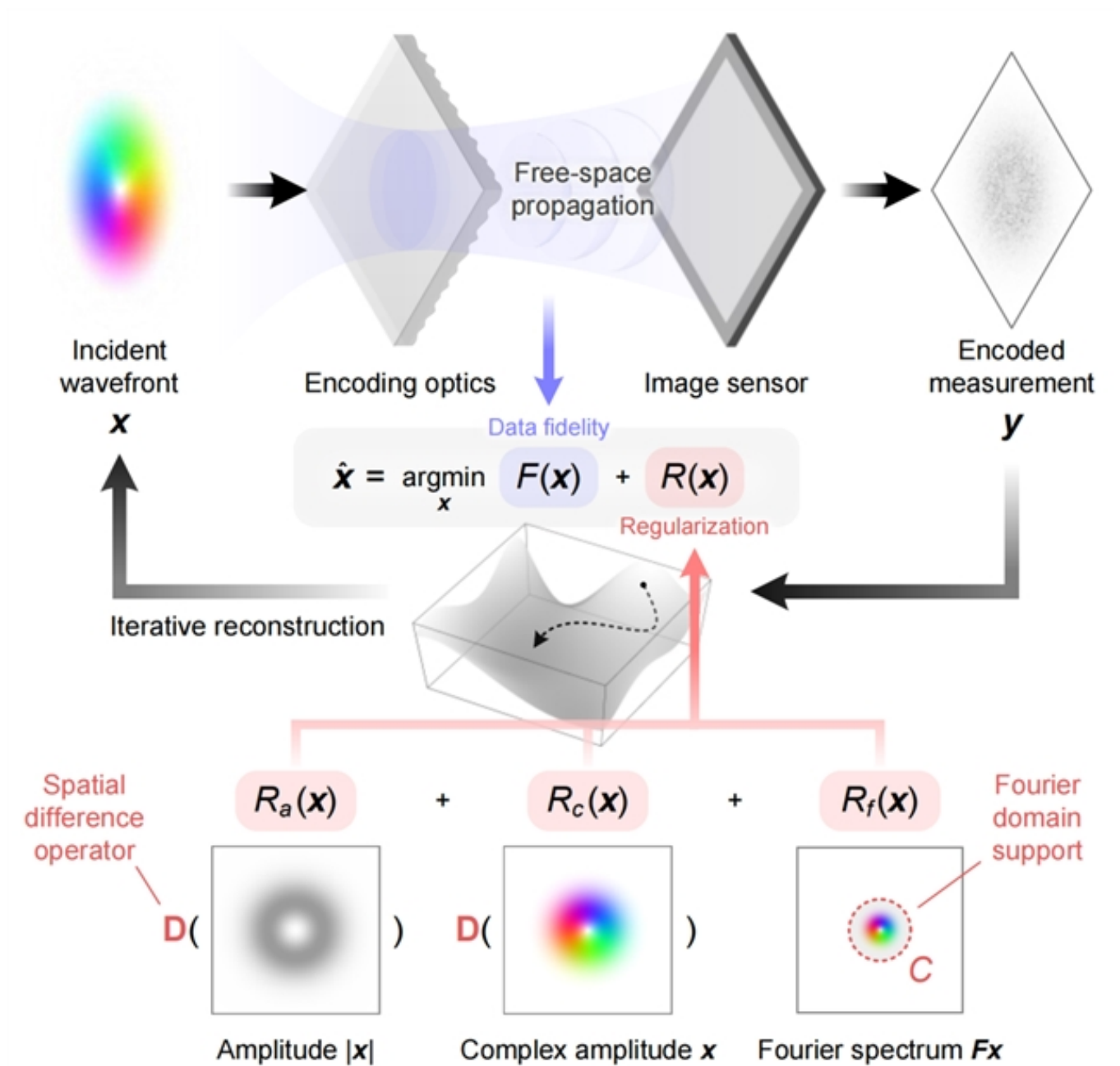


图3：SAFARI波前反演方法原理

不同于夏克-哈特曼波前传感器等采用的相位梯度测量原理，SAFARI直接获取了波前的复振幅信息，从而能够避免前者固有的两个技术难题：它能够重建振幅剧烈变化的波前，并能够自然地处理相位奇点与突变。

作者基于SAFARI，构建了融合物理模型与先验信息的非凸优化问题，并开发了基于快速近端梯度方法的数值求解算法，在数百次迭代内即可收敛，从一张观测散斑图像反演得到波前的振幅和相位信息。

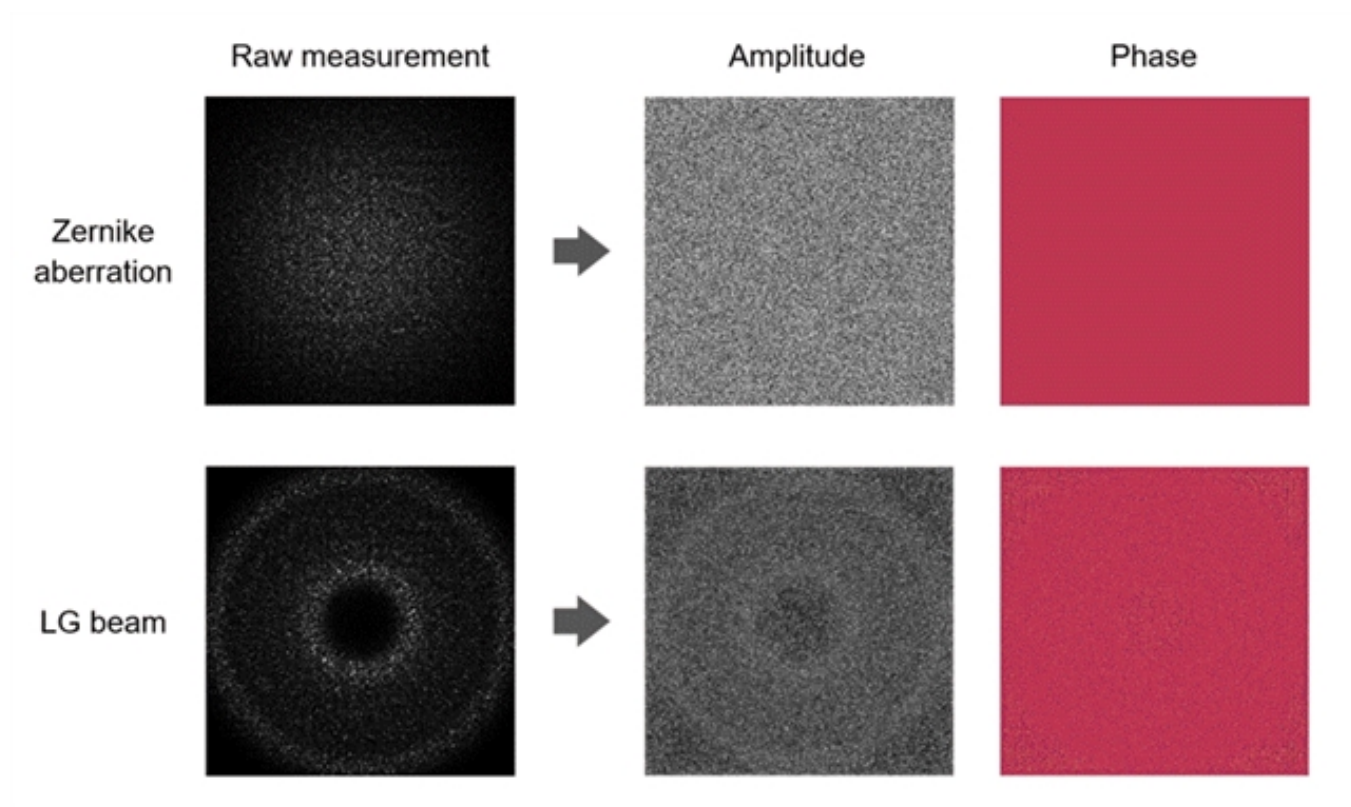


图4：SAFARI波前迭代计算重建过程

三、波前传感器的应用演示

案例一：大像差与强湍流的测量

面向工业精密检测与自适应光学领域，对像差与湍流波前表征的核心需求，作者测量了具有不同阶数和不同动态范围的泽尼克像差，以及模拟生成的湍流波前。

采用计算波前传感器，实现了均方根误差约 $\lambda/30$ 、动态范围达 313λ 的波前重建，性能与商用波前传感器相当；同时，能够准确表征包含200阶泽尼克多项式的高阶像差，体现了大像差、强湍流情况下的精准探测能力。

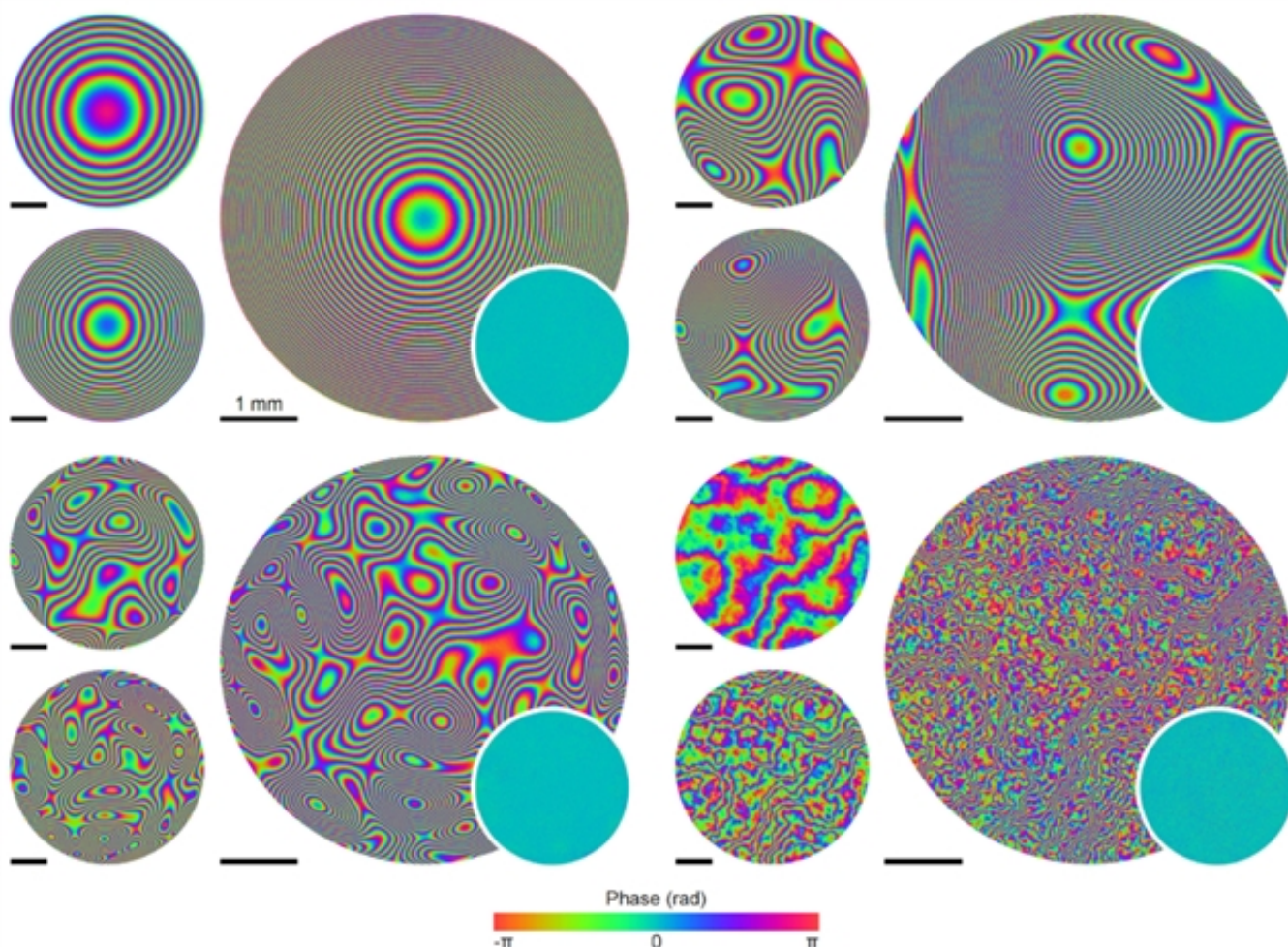


图5：大像差与强湍流的波前传感实验结果

案例二：各类结构光模式的探测

面向结构光这一热点研究领域，以及对结构光场测量表征的共性需求，作者测量了拉盖尔-高斯、厄米-高斯、因斯-高斯和贝塞尔-高斯光束等各类经典结构光场。

采用计算波前传感器，实现了对结构光场的准确表征，能够揭示其相位奇点和突变等复杂拓扑结构，轨道角动量的测量阶数可达150；除了单一结构光模式，也可实现复用结构光束的测量与模式分解，有望服务于结构光相关的基础研究和工业应用。

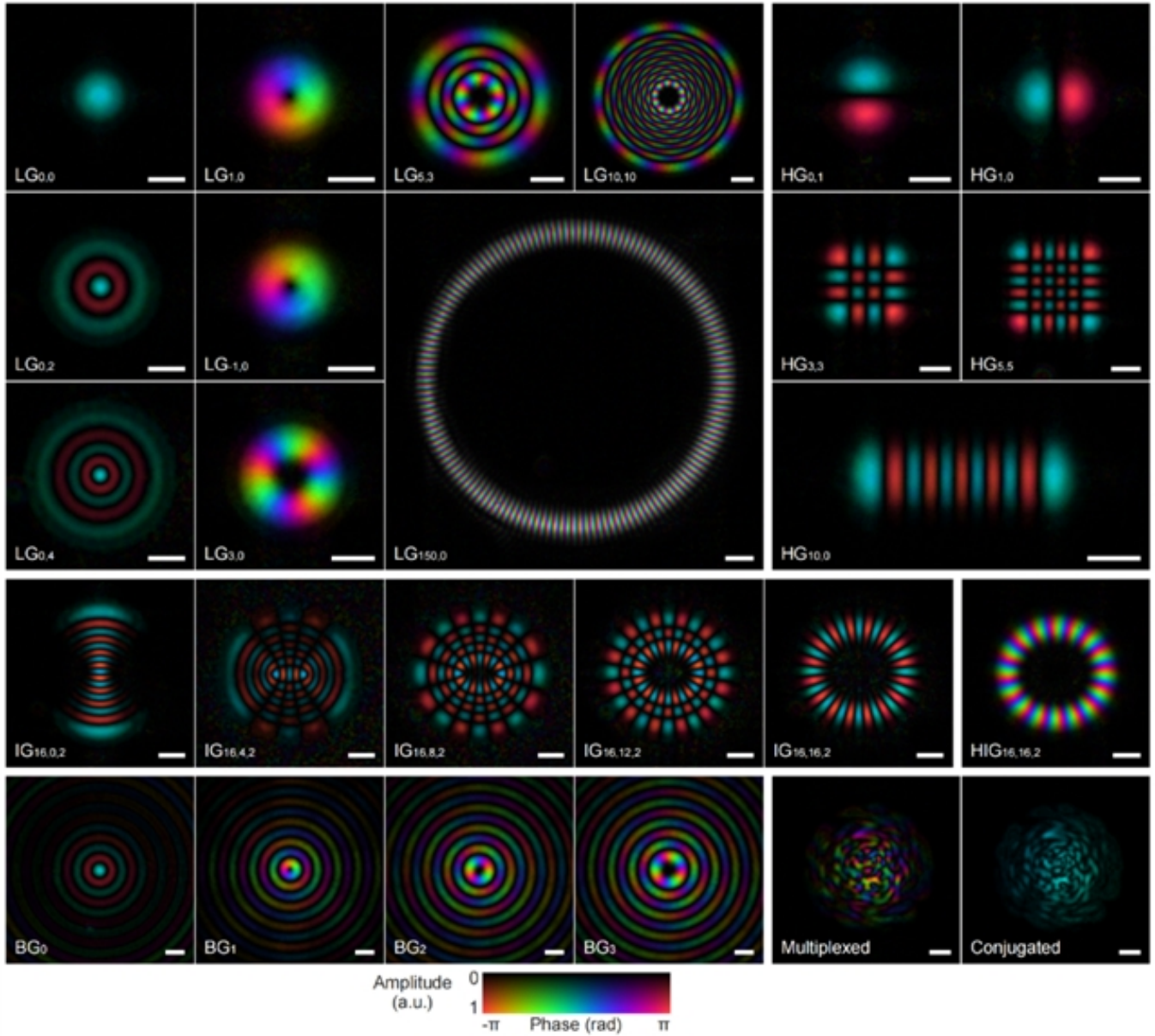


图6：各类结构光模式的波前传感实验结果

案例三：高密度散斑场的表征

面向散射成像与光场调控等领域，围绕散斑场表征的长久难题，作者开展了针对高密度散斑场的波前传感实验，挑战光场探测的信息密度极限。

采用计算波前传感器，全视场内能够测量的空间模式数可达192000，平均散斑颗粒尺寸仅为15微米，展现了该波前传感器极高的探测自由度，为复杂介质中的光场调控与信息解译带来了可能。

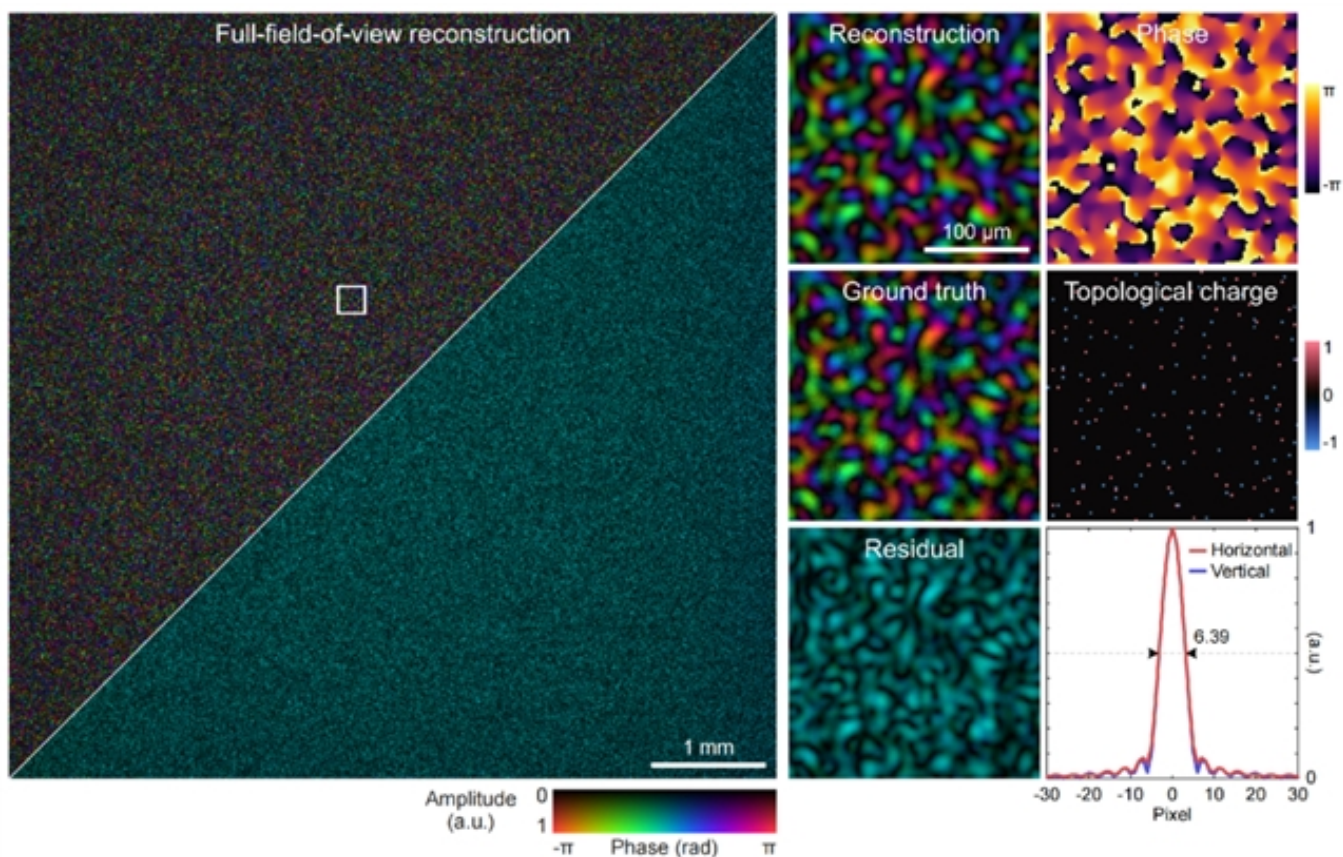


图7：高密度散斑场的波前传感实验结果

案例四：全息成像

面向无标记显微成像与检测等应用，作者充分发挥该方法的空间分辨率优势，开展了对多种振幅型与相位型物体的成像实验。

采用计算波前传感器，成功实现了对不同空间尺度和吸收特性物体的全息成像，体现了其优异的场景适用性；同时，能够测量离焦波前的复振幅，从而实现任意距离的数值重聚焦，可对离焦采集的物体进行数值计算校正，体现了计算波前传感器复振幅成像的独特优势。

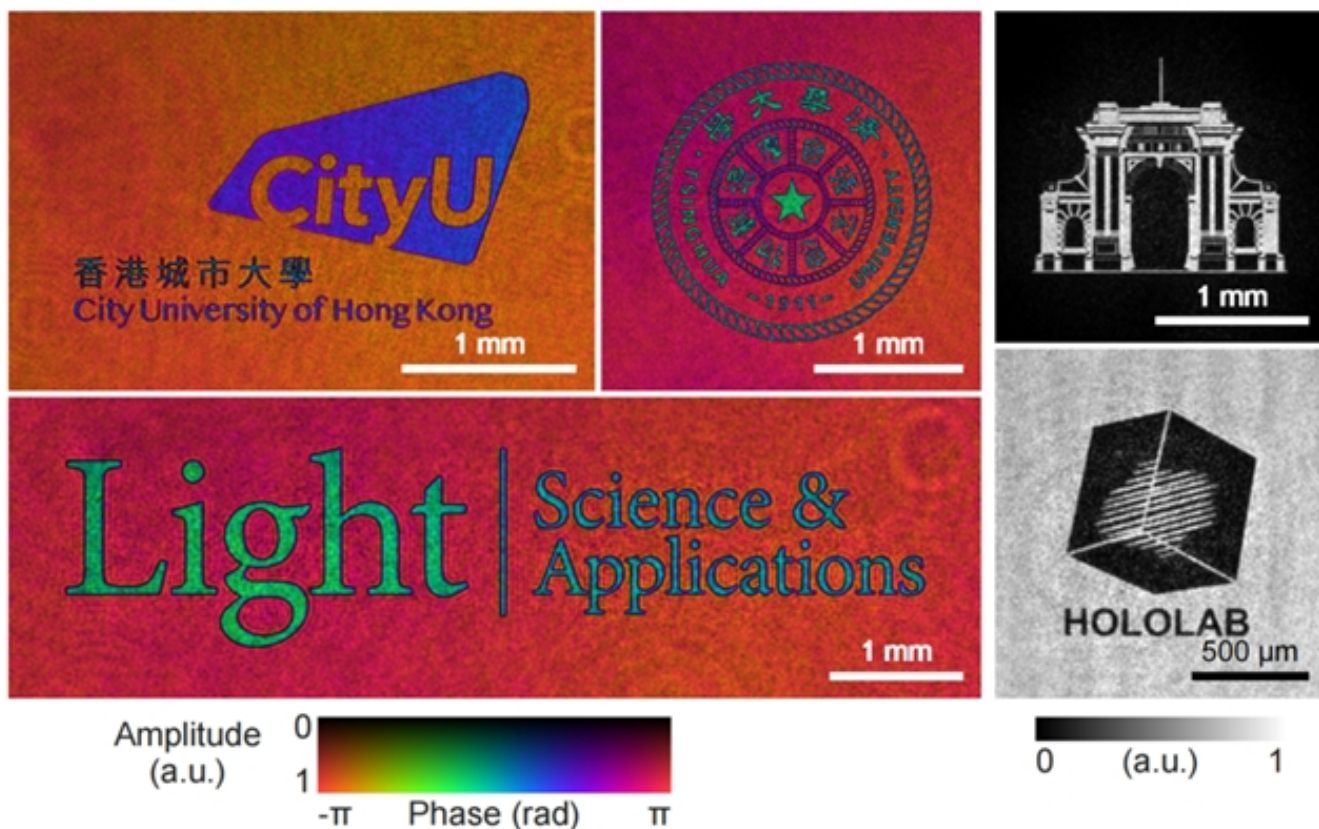


图8：相位型与振幅型物体的波前传感实验结果

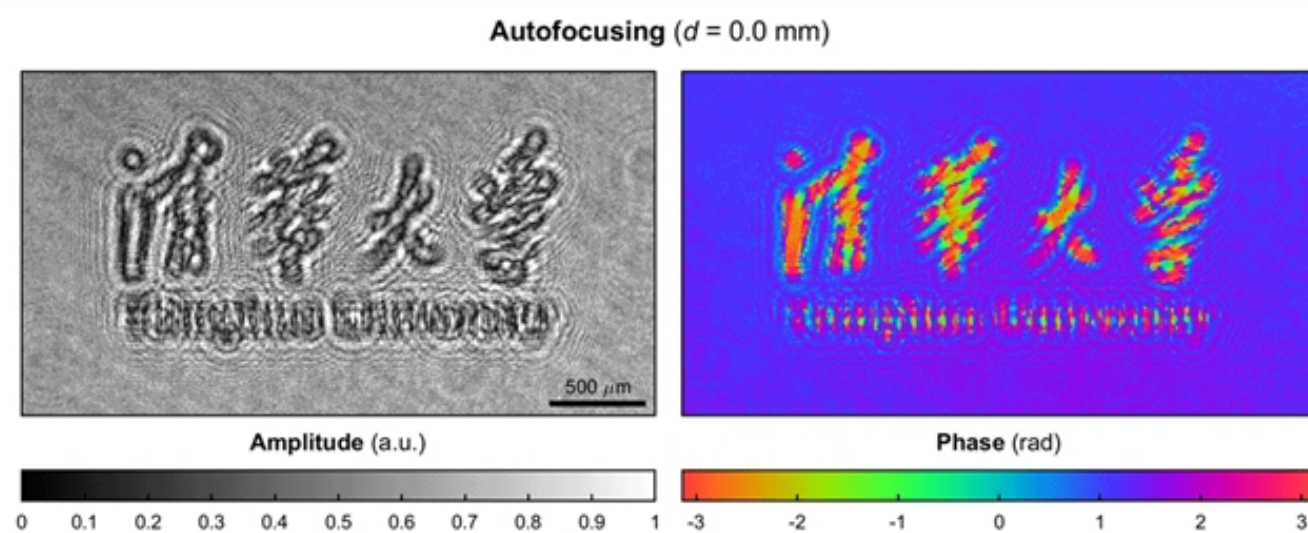


图9：离焦波前的数值重聚焦过程中得到的振幅和相位图像

四、总结与展望

该研究提出了一种面向复杂光场的计算波前传感技术。通过结合集成化的散射编码波前传感器与SAFARI波前重建方法，可以根据单次曝光图像，准确表征包含复杂拓扑结构与空间特征的光场波前。

该技术能够实现与现有商用波前传感器相当的测量精度及动态范围，同时又具备高空间分辨率与高探测模式密度，可应用于高阶像差、结构光、散斑场、离焦场等复杂光场的测量，也可实现定量相位成像等功能，有望为复杂环境下的相干光场感知与成像应用开辟更为广阔的前景。（来源：中国光学微信公众号）

相关程序代码已在GitHub开源：<https://github.com/THUHoloLab/SAFARI>

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-026-02241-5>

作者：蔡定平等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发