

杨佳苗田大鹏等 Light 图论计算模型突破Shack-Hartmann波前传感动态范围极限

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/42693.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！

杨佳苗田大鹏等 Light 图论计算模型突破Shack-Hartmann波前传感动态范围极限。 导读

夏克-哈特曼波前传感器（SHWS）作为一种经典的非干涉波前测量技术，在众多科研领域应用广泛。然而，在大斜率复杂波前测量中，光斑的子孔径串扰与形貌畸变使其动态范围存在固有局限，从根本上限制了对复杂波前的测量能力。近日，上海交通大学杨佳苗团队与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所动态光学成像与测量全国重点实验室田大鹏团队合作提出了一种基于图结构的计算框架 G-SHWS，大幅突破传统 SHWS 的测量极限，实现了大动态范围下的高精度波前重建，并在严重光斑缺失条件下保持优异鲁棒性。该方法为大动态范围波前传感开辟了新的计算路径。相关成果以 Large dynamic range Shack-Hartmann wavefront sensing based on a graph-theoretic computational model 为题发表于 Light: Science Applications。

夏克-哈特曼波前传感器（SHWS）作为一种经典波前测量技术，广泛应用于半导体光刻装备检测、激光通信、生物医学成像和天文观测等领域。然而，在大斜率复杂波前测量中，光斑跨子孔径串扰会引发光斑-子孔径匹配错误；显著形貌畸变也会使单一质心位移难以准确表征局部波前信息。这些因素从根本上限制了 SHWS 的可测动态范围。

围绕这一瓶颈，已有研究主要沿硬件改进和算法增强两条路径展开。硬件方案虽可通过改变光学结构抑制光斑串扰，但往往带来灵敏度下降、光效率降低或系统复杂度提升等代价；算法方法虽更加灵活，却仍难以摆脱局部匹配外推、质心位移表征和隐式图像学习的限制，动态范围扩展仍十分有限。因此，如何在超大动态范围下同时实现可靠光斑匹配与高精度波前重建，仍是该领域亟待解决的关键难题。

一、提出图论驱动的 SHWS 计算框架，实现全局拓扑重建的新范式

针对以上核心难题，研究团队提出了一种基于图结构的计算框架 G-SHWS，将波前传感过程从传统的局部光斑位移测量提升为全局拓扑关系建模与高维特征重建。该框架以图结构重新建模大动态范围 SHWS 中被严重扰乱的光斑阵列：首先将实际探测光斑与由波前参数拟合生成的光斑抽象为二部图中的两类节点，通过最小化全局配对代价，驱动拟合光斑分布逐步逼近真实光斑分布，并将拟合光斑的子孔径归属关系映射至实际光斑，从而在严重串扰和部分光斑缺失条件下恢复准确的光斑-子孔径匹配关系。在此基础上，进一步构建了嵌入匹配拓扑结构的图注意力网络，将实际光斑及其对应子孔径建模为图节点，并为节点构建由空间位置信息、强度形貌特征和子孔径位置编码组成的特征向量，同时通过图边显式编码光斑-子孔径匹配关系及相邻子孔径对应光

斑之间的空间关联。通过图节点间的注意力聚合，网络能够融合光斑高维信息与全局拓扑关系，从强畸变光斑群中自适应提取高阶波前信息，从而突破传统单一质心位移表征的局限。该方法实现了全局匹配—拓扑编码—高维重建的一体化闭环，为突破SHWS动态范围限制提供了新的计算框架。

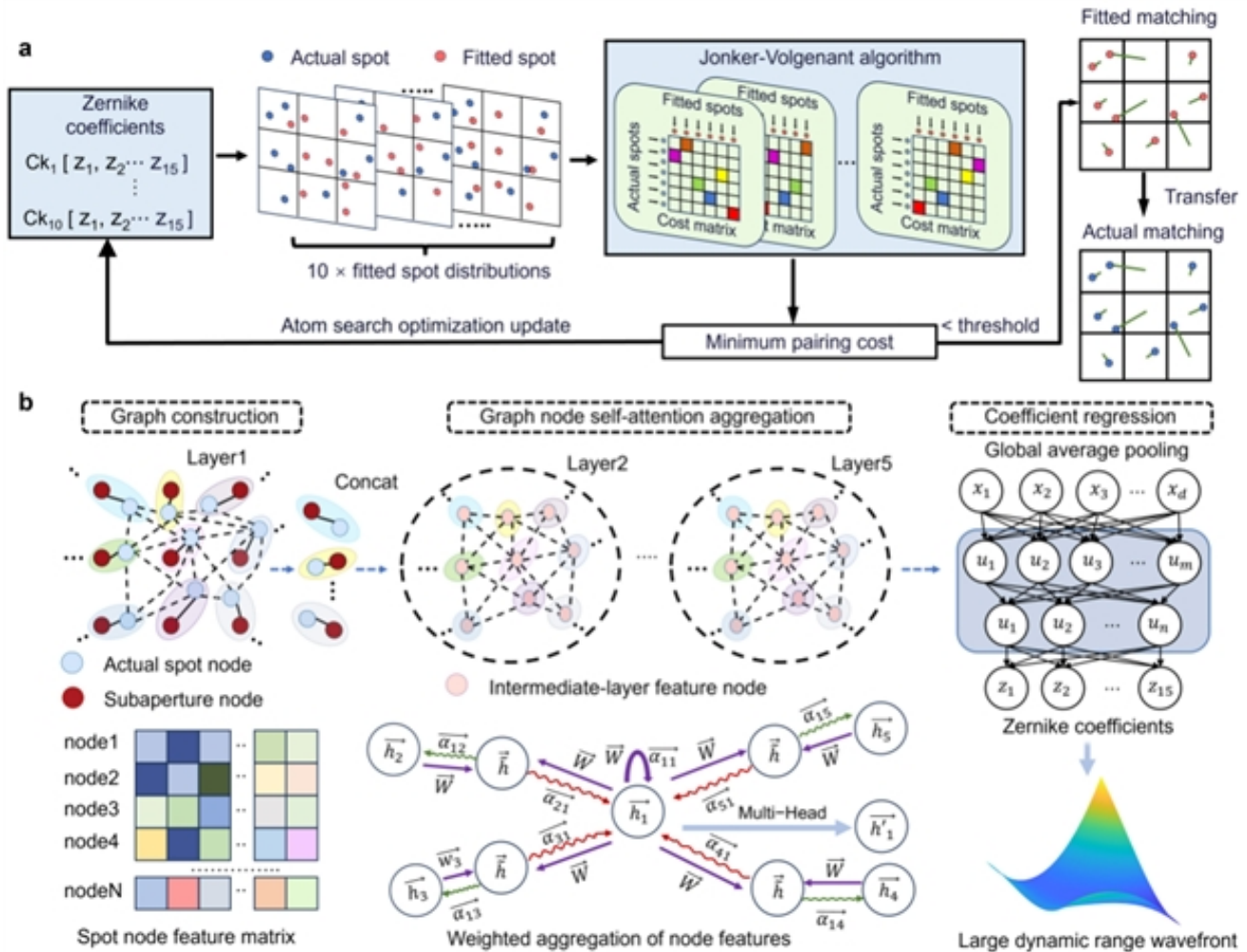


图1：G-SHWS 计算框架示意图

二、在极大动态范围下实现高精度匹配与重建，显著提升复杂波前测量能力

仿真和实验表明，在不改变硬件的前提下，G-SHWS 将 SHWS 的有效测量动态范围扩展至传统极限的 21 倍，并在该扩展范围内将重建误差稳定控制在 0.05λ 以内，体现出动态范围与重建精度的协同提升。进一步针对不同 Zernike 像差模式的测试表明，该方法对多种典型复杂波前均具有良好的适应性，能够在光斑分布发生不同形式拓扑扰动的情況下维持可靠测量。此外，面对具有随机空间扰动和复杂相位起伏的相位屏，G-SHWS 仍能有效恢复光斑匹配关系并实现高精度波前重建，进一步表明该方法大幅拓展了 SHWS 对复杂波前的测量能力。

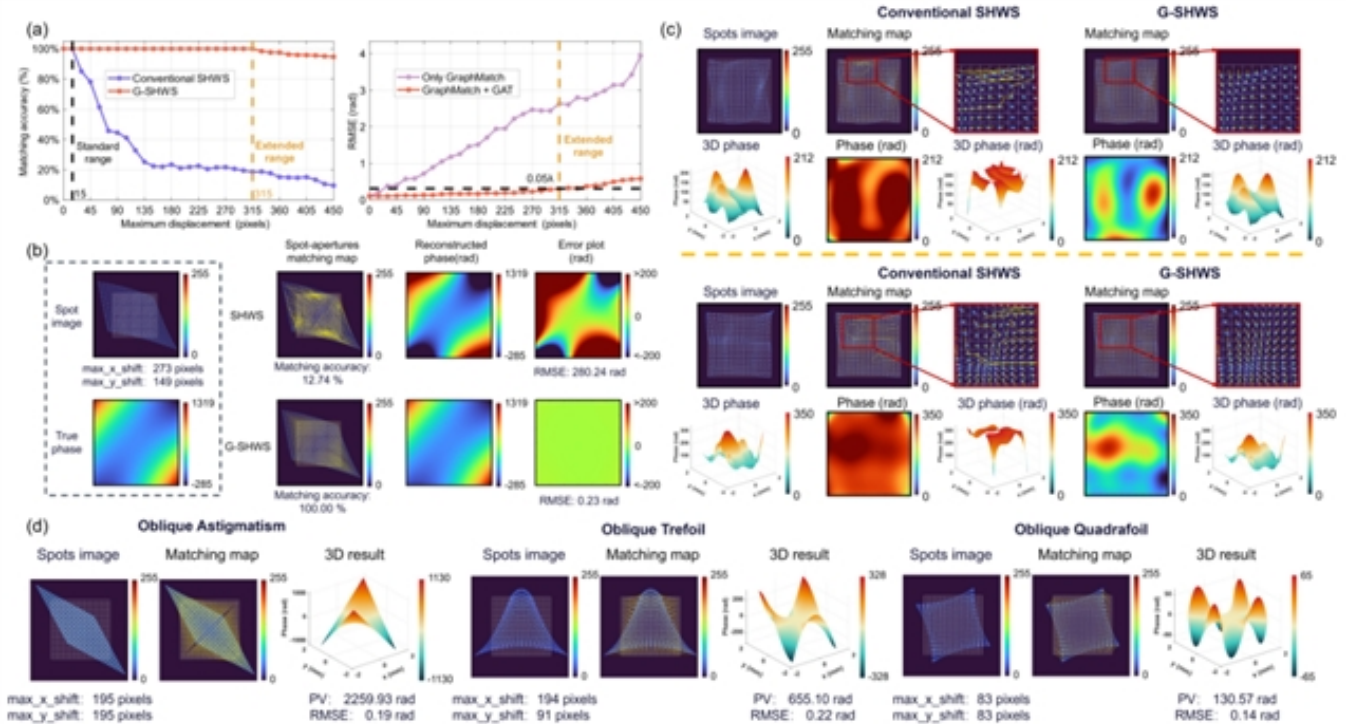


图2：G-SHWS和传统SHWS在多种类型大动态范围像差下的匹配和重建效果对比

三、面向非连续采样场景实现鲁棒波前感知，提升复杂测量环境适应能力

在实际测量中，视场遮挡、光路遮蔽等因素常会导致光斑缺失，破坏光斑阵列的全局拓扑结构，进而导致 SHWS 在非连续采样条件下失效。针对这一问题，G-SHWS 在全球匹配阶段引入高代价虚拟节点机制，自动识别并剔除由光斑缺失造成的无效匹配；在重建阶段，则基于匹配收敛后的估计波前生成代理光斑节点，对缺失区域进行物理一致的特征补全。结合图网络的邻域特征聚合，G-SHWS 能够利用周围有效光斑信息补偿局部缺失造成的信息断裂，从而实现稳定的波前恢复。实验结果表明，即使在光斑缺失比例超过 50% 的情况下，G-SHWS 仍能实现可靠重建，大幅提升了 SHWS 在非连续采样条件下的测量能力。

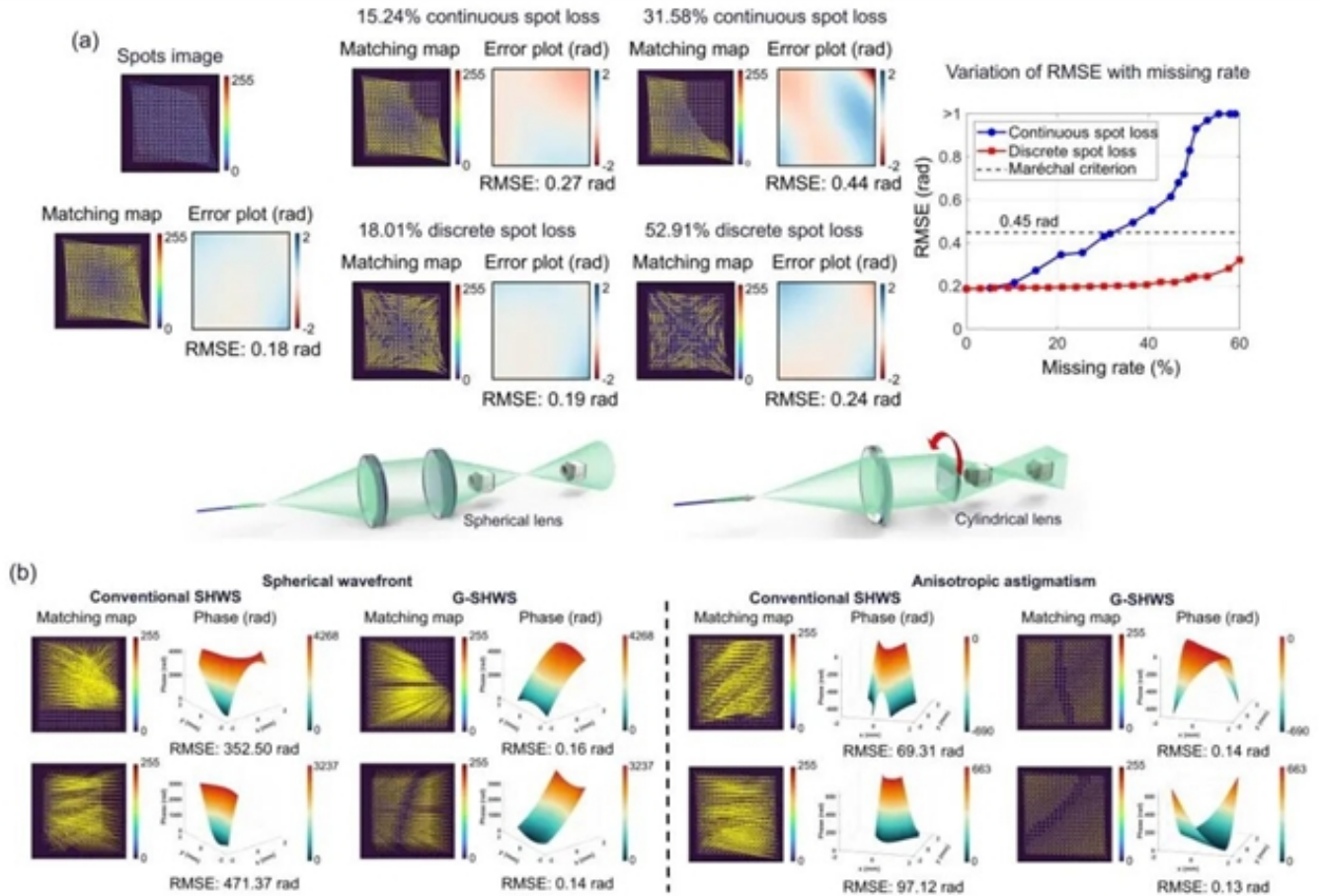


图3：G-SHWS和传统SHWS在非连续采样场景下的匹配和重建效果对比

总结与展望

G-SHWS 在不改变硬件结构的前提下，大幅扩展了 SHWS 的有效测量范围，并在极大动态范围和非连续采样条件下保持高精度重建能力，展现出计算赋能传统光学传感的重要潜力。该方法有望为天文自适应光学、空气动力光学像差探测、高阶眼像差诊断等应用提供新的技术支撑。

未来，面向更大动态范围波前重建，可进一步发展多峰光斑分割与特征提取方法，以增强模型对极端畸变光斑的表征能力；同时，通过优化图匹配求解过程和网络推理效率，有望进一步提升系统实时性，推动大动态范围波前传感向更复杂、更高速的应用场景拓展。（中国光学微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-026-02273-x>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：杨佳苗等 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