
非局域超构透镜实现远场超分辨成像

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/39215.html>

本文仅供学习交流之用，版权归作者所有，请勿用于商业用途！

非局域超构透镜实现远场超分辨成像。

ISSN 2662-8643(online)

CN 22-1427 / 04

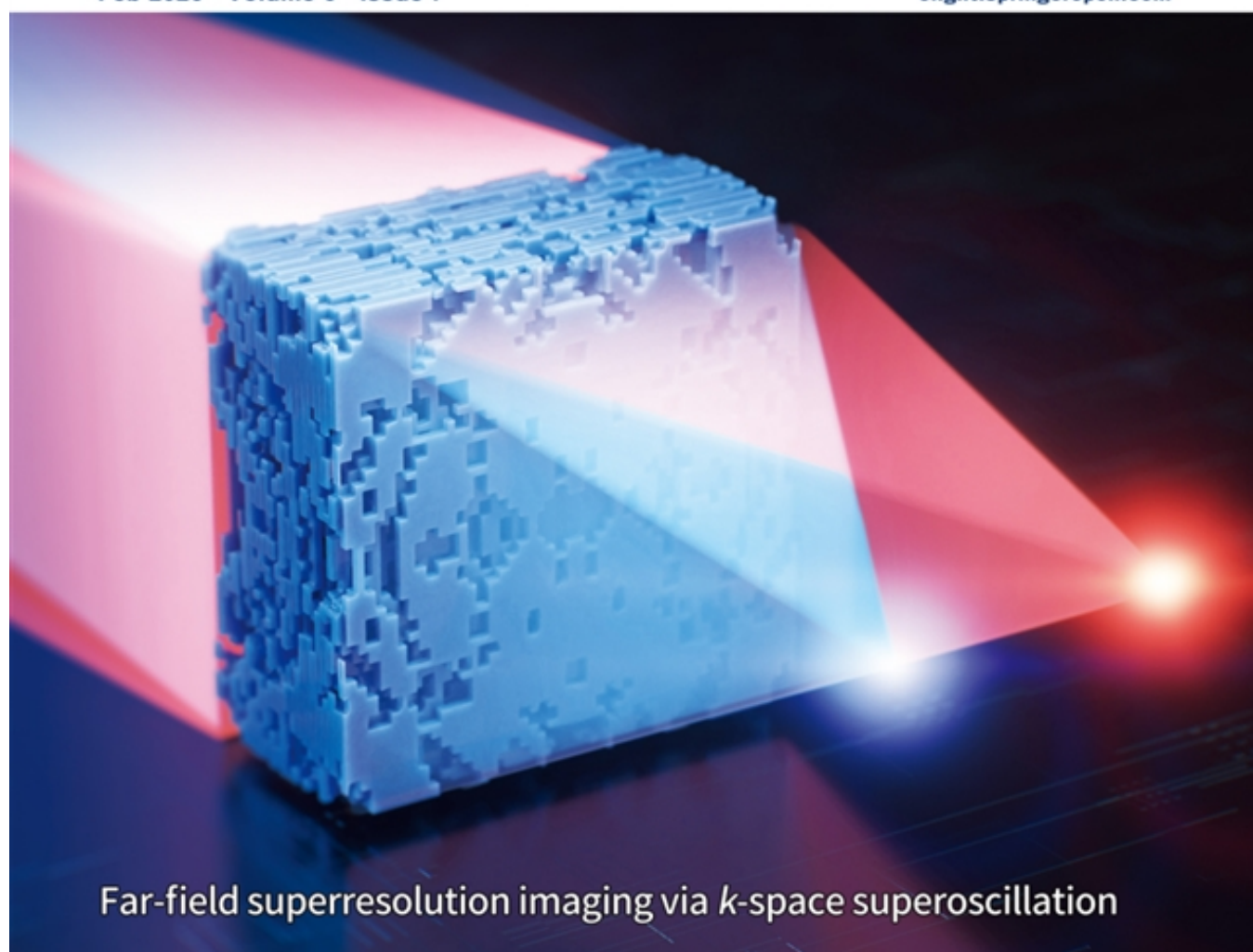
ISSN 2097-1710(print)

eLight



Feb 2026 · Volume 6 · Issue 7

elicht.springeropen.com



Far-field superresolution imaging via *k*-space superoscillation

ISSN 2097-1710



 **Light** | Publishing Group

SPRINGER NATURE

导读

1873年，恩斯特·阿贝提出了著名的衍射极限理论，指出光学系统的分辨率受限于光波波长与数值孔径。长期以来，成像系统的分辨率一直受限于阿贝-瑞利衍射极限。这意味着为了获取更高的空间分辨率，光学系统往往不得不依赖更大的物理孔径，正如天文望远镜为了看得更清必须拥有巨大的镜面。虽然2014年诺贝尔化学奖表彰的超分辨荧光显微技术成功打破了这一桎梏，但现有手段仍难以在远场、无标记且不依赖样品特性的条件下，实现单次确定性的超分辨成像。

近日，清华大学精密仪器系杨原牧副教授团队提出了一种名为 k 空间（动量空间）超振荡的新体制远场无标记超分辨成像方法。该方法通过设计一种在实空间和 k 空间均具有拓扑优化响应的超构透镜，打破了经典成像系统中的空间平移不变性假设，从而突破衍射极限。初步微波实验验证了该方法可在无需后处理的情况下实现了超越衍射极限两倍以上成像分辨率。相关研究成果以 *Far-field super-resolution imaging via k -space superoscillation* 为题发表于 *eLight*（影响因子32.1，入选两期卓越计划）。

提高成像分辨率对于推动跨越各尺度的复杂结构和现象的研究至关重要，为从生物学到天文学等领域提供了关键见解。然而，瑞利判据设定了理论分辨率极限。根据阿贝成像理论，光传播表现为带限且空间平移不变的系统，会滤除超出孔径限制的空间频率分量。这种高频分量的缺失本质上限制了图像分辨率。

为了突破这一限制，科学家们发展了多种超分辨技术：近场扫描光学显微镜虽然精度极高，但依赖探针逐点扫描，受限于近场区域且工作距离极短；荧光显微镜（如STED、PALM）实现了远场观测，却依赖荧光标记且成像速度较慢；结构光照明等无标记方法虽有前景，但通常需要多帧图像合成。此外，基于计算成像和深度学习的方法虽能提升分辨率，但往往依赖先验知识或面临黑盒可靠性问题。

近年来，基于超振荡（superoscillation）现象的无标记远场超分辨技术备受关注。当带限函数的局部振荡快于其全局最大频率时，便会发生超振荡。在平移不变成像系统中，利用这一现象可以在有限范围内产生超出系统全局截止频率的局域空间频率，从而生成亚衍射极限的点扩散函数。然而，此类系统面临着固有的权衡：随着点扩散函数尺寸的减小或视场的扩大，超振荡区域内的能量会降低，同时区域外会伴随产生高强度的边带。这要求物体必须在空间上受限，以避免边带干扰。

本文提出了一种利用非局域超构透镜实现 k 空间超振荡的新体制远场无标记超分辨成像方法。为了阐明其工作原理，首先回顾传统局域透镜的光学特性。如图1a所示，传统局域透镜将入射角为 θ 的平面波聚焦到焦平面上 $f \tan \theta$ 的位置。图1b显示了其角度依赖的透射场分布，该分布随入射横向波数的变化速率本质上受限于物理孔径 D ，这也正是局域透镜分辨率受限的根源。为了突破衍射极限，一种潜在的方法是将入射角为 θ 的平面波聚焦到 $2f \tan \theta$ 的位置，同时保持焦斑尺寸不变（图1c）。由此得到的透射场随入射横向波数的变化速率提升为原来的两倍（图1d），从而实现了两倍的超分辨倍数。要实现这种特殊的角度依赖透射场分布，要求透镜必须具备非局域响应。当透射场在一定角度范围内的变化速率超过了物理孔径所决定的理论极限时，便产生了 k 空间超振荡现象。与传统实空间超振荡不同，该机制在不产生像面边带的前提下突破了衍射极限，且在视场范围、能量效率以及抗扰动鲁棒性方面均展现出优势。实现这一机制的关键在于设计能够实现所需角度依赖透射场的非局域器件。

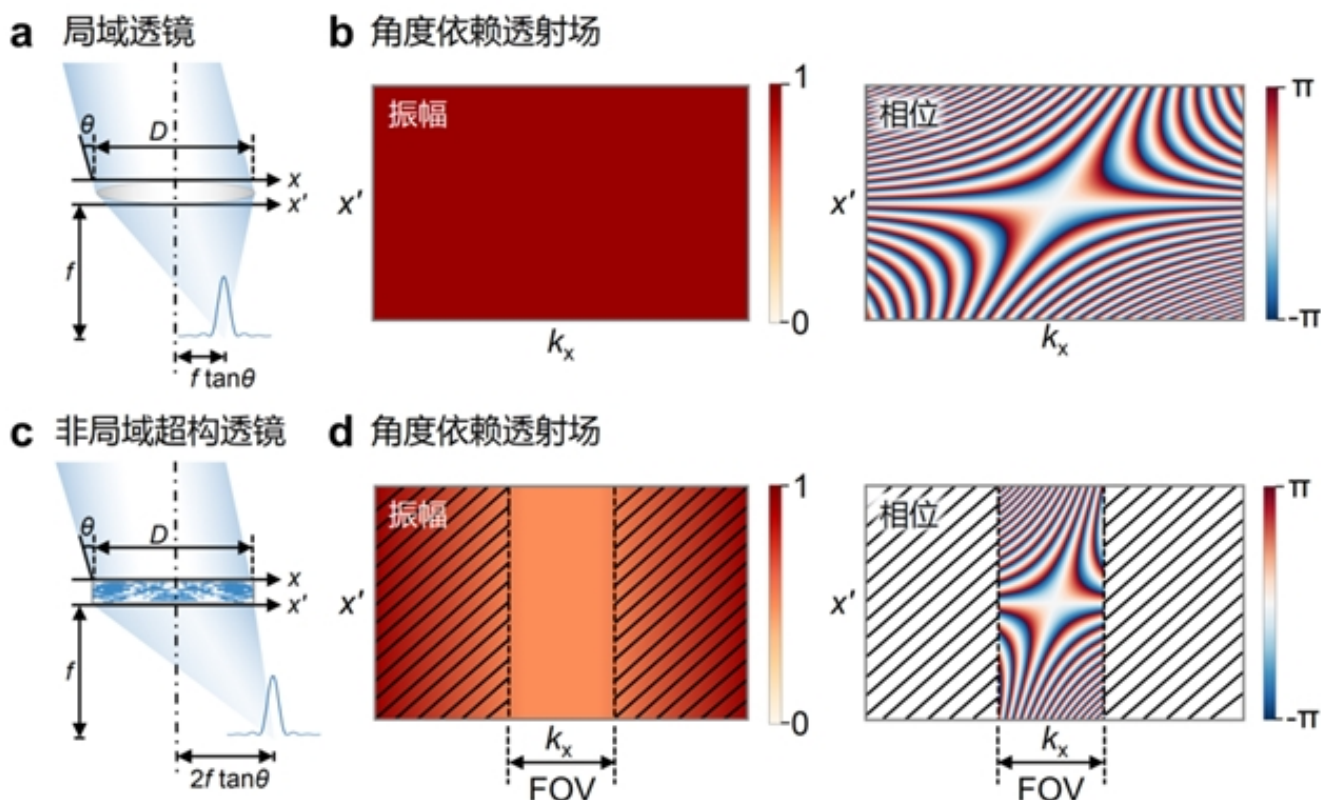


图1：利用非局域超构透镜实现 k 空间超振荡超分辨成像的工作原理。(a, b) 局域一维柱透镜的示意图及其角度依赖透射场分布。(c, d) 非局域超构透镜的示意图及其角度依赖透射场分布

为此，研究团队通过高效逆向优化的方法设计并制造了一个工作在30 GHz微波波段的三维非局域超构透镜原型。该透镜由24层图案化聚丙烯板组装而成（图2a），并利用微波扫描系统进行了实验表征（图2b）。作为对比，团队同时也制造并测试了传统的局域折射透镜（图2d, e）。为了评估成像分辨率，研究团队使用不同间距的双点源作为目标物体进行测试。实验结果显示，根据瑞利判据，传统局域透镜仅能分辨间距为 2.90λ 的两个点源（图2f）。而在相同条件下，无需任何后处理，非局域超构透镜能够直接分辨间距仅为 1.38λ 的点源（图2c），实现了2.10倍的分辨率提升。此外，该透镜实现了2.24%的聚焦效率，显著优于具有相当超分辨倍数和视场的实空间超振荡系统。

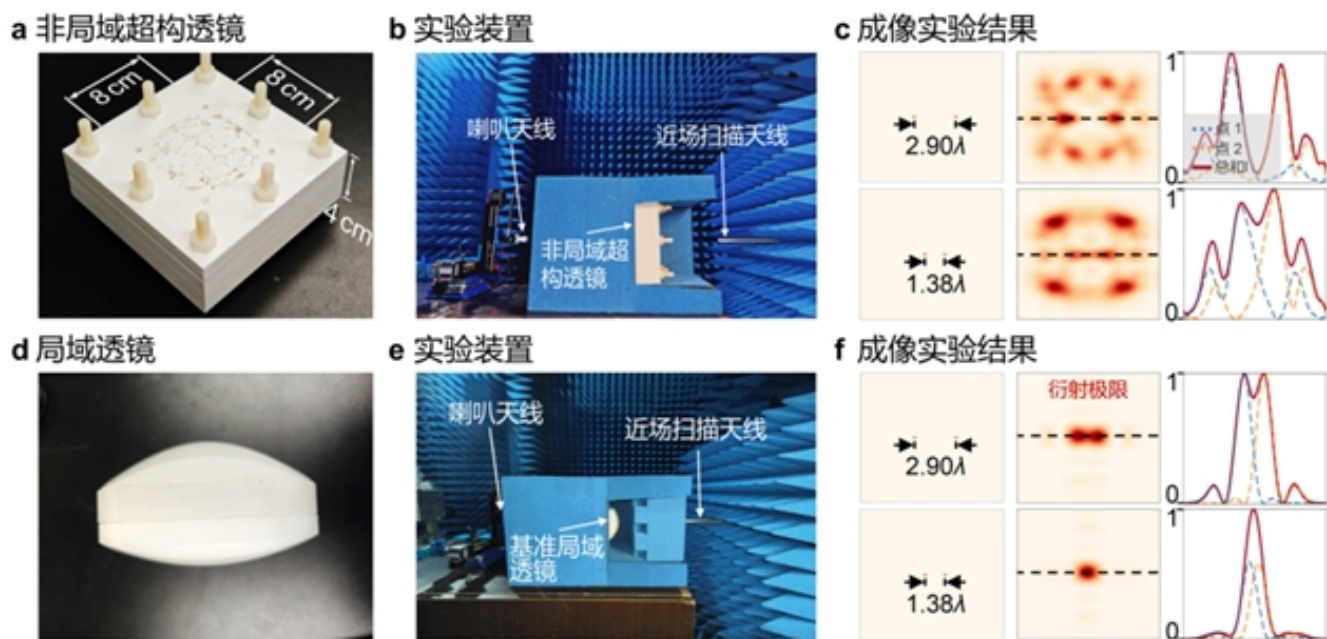


图2：超构透镜的实验表征。(a, b) 24层聚丙烯非局域超构透镜原型照片及其微波实验测量装置。(c) 非局域超构透镜对不同间距双点源的成像结果。(d, e) 对比用的传统局域透镜照片及其测量装置。(f) 局域透镜对不同间距双点源的成像结果

总结与展望

本研究提出并实验验证了一种名为 k 空间超振荡的新体制远场无标记超分辨成像方法。通过设计在实空间和 k 空间均具有拓扑优化响应的非局域超构透镜，该方法打破了经典成像系统中的空间平移不变性假设。微波实验结果表明，该原型在无需后处理的情况下，针对双点源目标实现了超越衍射极限两倍以上成像分辨率，且消除了实空间超振荡固有的像面边带。

该技术在微波波段的波达方向估计、毫米波成像以及巡天等领域具有广阔的应用前景。同时， k 空间超振荡的物理机制具有普适性，并不局限于特定频率。研究团队通过仿真验证了其向光学频率扩展的可行性。随着纳米制造技术的进步，利用级联衍射层结构，有望在光波段构建出基于这一新机制的物理器件。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1186/s43593-026-00121-4>

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：杨原牧等 来源：eLight

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

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