
光纤收发一体的旋转多普勒测速

作者：writer 来源：科学网

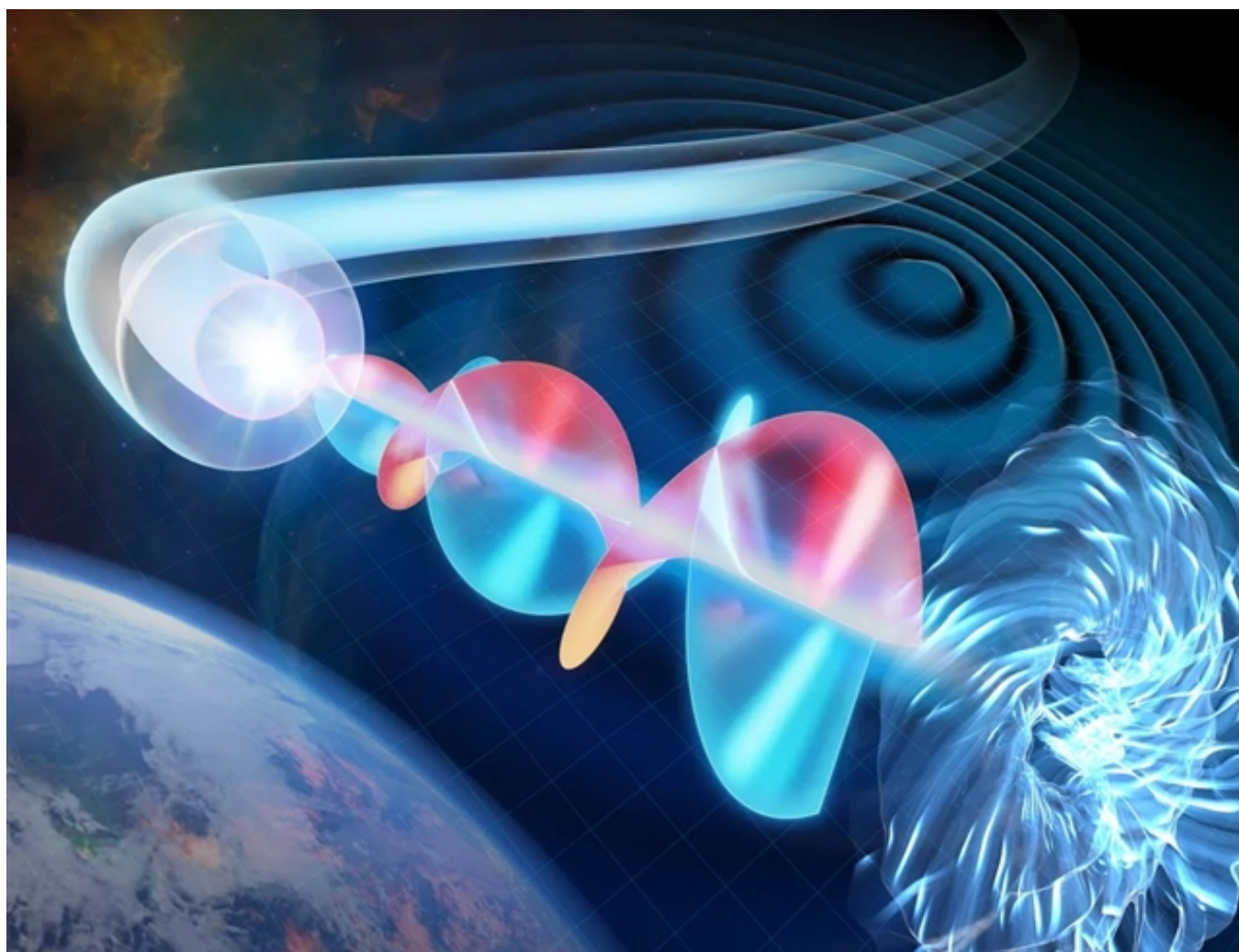
本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/33337.html>

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

近年来，随着对光场物理维度的探索，人们发现利用光场的轨道角动量，能产生与物体的旋转速度有关的光频率变化，即旋转多普勒效应。基于该理论发展的旋转多普勒测速技术，为角速度测量研究开辟了新思路。为了突破现有技术成本高、体积大、灵活性差等局限，华中科技大学王健教授领导的多维光子学实验室（MDPL）团队提出并开发了首款收发一体的全光纤旋转多普勒测速技术，该技术具有集成度高和超宽带工作的特点，为实现小型化的新型光学测量工具提供了可能，在多场景的运动监测中具有广阔的应用前景。

该成果以Compact and reciprocal probe-signal-integrated rotational Doppler velocimetry with fiber-sculpted light为题发表在国际顶尖学术期刊《Light: Science Applications》，并入选封面文章。



light封面文章

研究背景

多普勒效应（Doppler effect）是一种经典的物理现象，其描述了波源和观察者之间发生相对运动时引起的波的频率偏移。通常，多普勒效应被认为是对线动量或线性相位梯度的响应，此时所分析的对象为平移运动。近年来，随着人们对新型光场物理维度研究的深入，发现多普勒效应还能与角动量相关联，由此，多普勒效应被进一步发展为其横向形式，即旋转多普勒效应。从光场模式分析的角度，旋转多普勒效应被描述为：当光场与旋转运动物体相互作用，模式中的轨道角动量（orbital angular momentum, OAM）受到调制的同时，产生与OAM变化量成正比的频率偏移。

在光学测量的诸多方法中，基于多普勒效应发展的激光多普勒测速是一种被广泛应用的技术，具有测量精度高、测量范围广、响应速度快、非接触测量等优势，能克服传统测量技术的一些局限。近年来，随着旋转多普勒效应理论研究的完善，基于其开发的旋转多普勒测速技术被应用于散射体、微粒和涡流等对象的旋转运动测量中。作为一种高效的新型角速度测量技术，旋转多普勒测速展现出巨大的潜力。然而，目前建立的旋转多普勒测速系统通常由自由空间配置的离散光学元件组成，存在成本高、体积大、灵活性差等问题，在实际应用中面临很大挑战。

创新研究

本研究首次提出收发一体的全光纤旋转多普勒测速技术（all-fiber rotational Doppler velocimetry, AF-RDV）。该技术的核心器件为超宽带的模式选择耦合器，其具有低插入损耗的性能，可实现模式的转换、滤波及传输。模式选择耦合器采用单模光纤和多模光纤通过模式耦合理论设计，其制作过程包括：单模光纤预拉锥、单模与多模光纤扭结及熔融拉锥。通过模式有效折射率匹配，可实现单模光纤中的高斯基模与多模光纤中的OAM叠加模式之间的转换。图1展示了全光纤旋转多普勒测速技术的概念原理，其中根据输入输出端口的选择，可以达到互易的工作方式，分别为正向操作（a）和反向操作（b）。

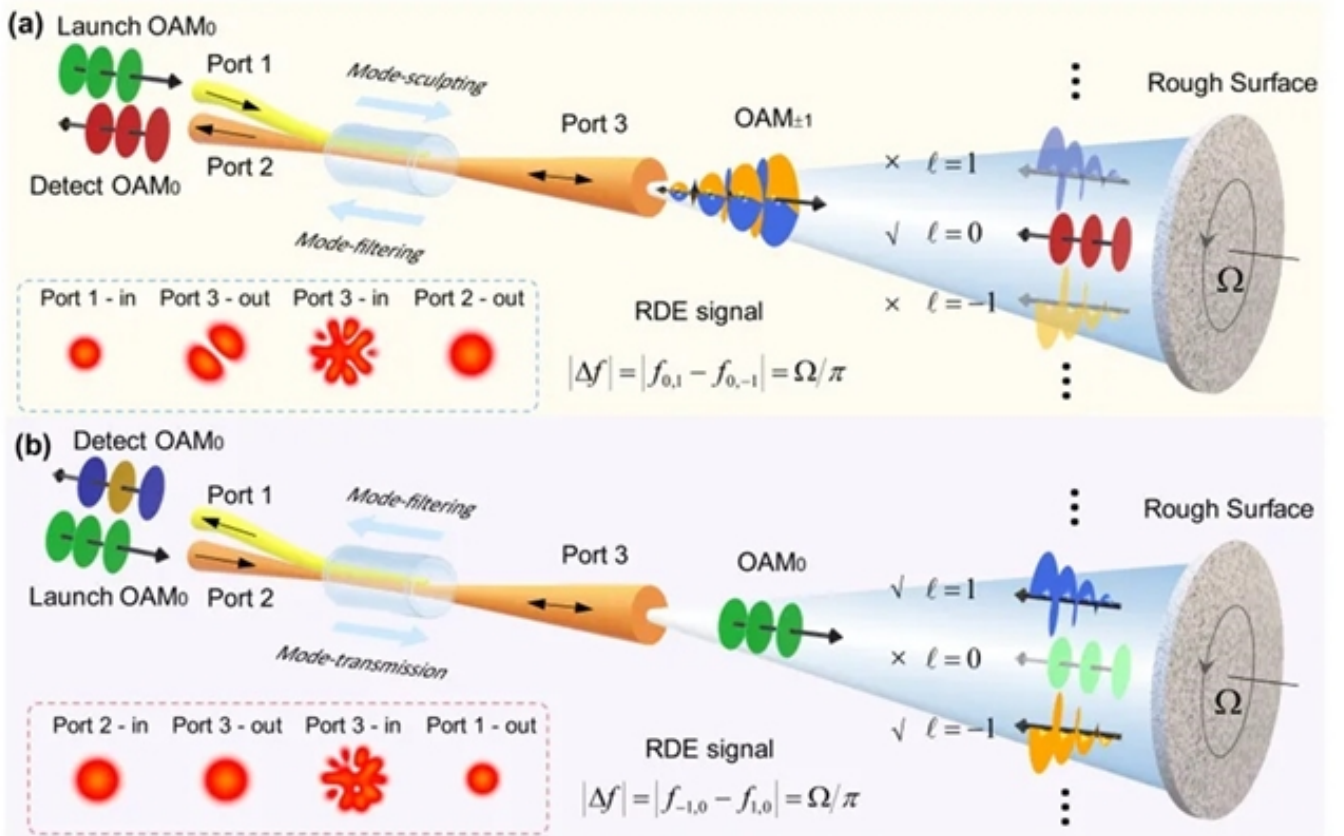


图1. 光纤收发一体的旋转多普勒测速。

在图1（a）所示的正向操作中，高斯基模从端口1的单模光纤输入，经模式选择耦合器被转换为一阶线偏振模式，即 ± 1 阶OAM叠加模式。其作为探测光照射待测旋转物体后，被散射体调制成具有多重OAM模式组分的散斑，其中不同OAM模式携带和模式改变量有关的旋转多普勒频移。散射光经由端口3接收，在历经模式选择耦合器拉锥区域的模式滤波后，在端口2采集多普勒拍频信号，此时所采集信号主要为散射光中的高斯基模。在图1（b）所示的反向操作中，高斯基模从端口2的多模光纤输入，直接传输到端口3以高斯基模照射待测旋转散射体。散射光经端口3接收，此时其中的 ± 1 阶OAM叠加模式将被转换为高斯基模回传至端口1，其他模式组分被滤除。由此，在两种操作中，交换输入和输出端口，系统的输入和输出模式不变，这表明旋转多普勒效应应具有模式相关特性，且其测试系统为互易的。系统中的探测照明与信号采集均由同一端口实现，因此其具有收发一体的特点，可有效提升系统集成度。通过对输出端口采集信号进行傅里叶分析，可从频谱中提取多普勒拍频，进而数值计算获取旋转速度信息。理论分析表明，旋转多普勒效应是波长无关的，这在本研究中通过实验进行了验证，如图2所示。本研究设计的模式选择耦合器具有超宽带消色差性能。通过采用可调谐激光器在1500 nm到1620 nm以10 nm为间隔进行扫谱测量，观察到模式选择耦合器转换的模式保持较高纯度。由此，本研究所开发的全光纤旋转多普

勒测速系统具有超宽带的工作性能，且测量精度不会受到激光线宽和温度漂移等因素的影响，可大大降低系统搭建与维护的成本。

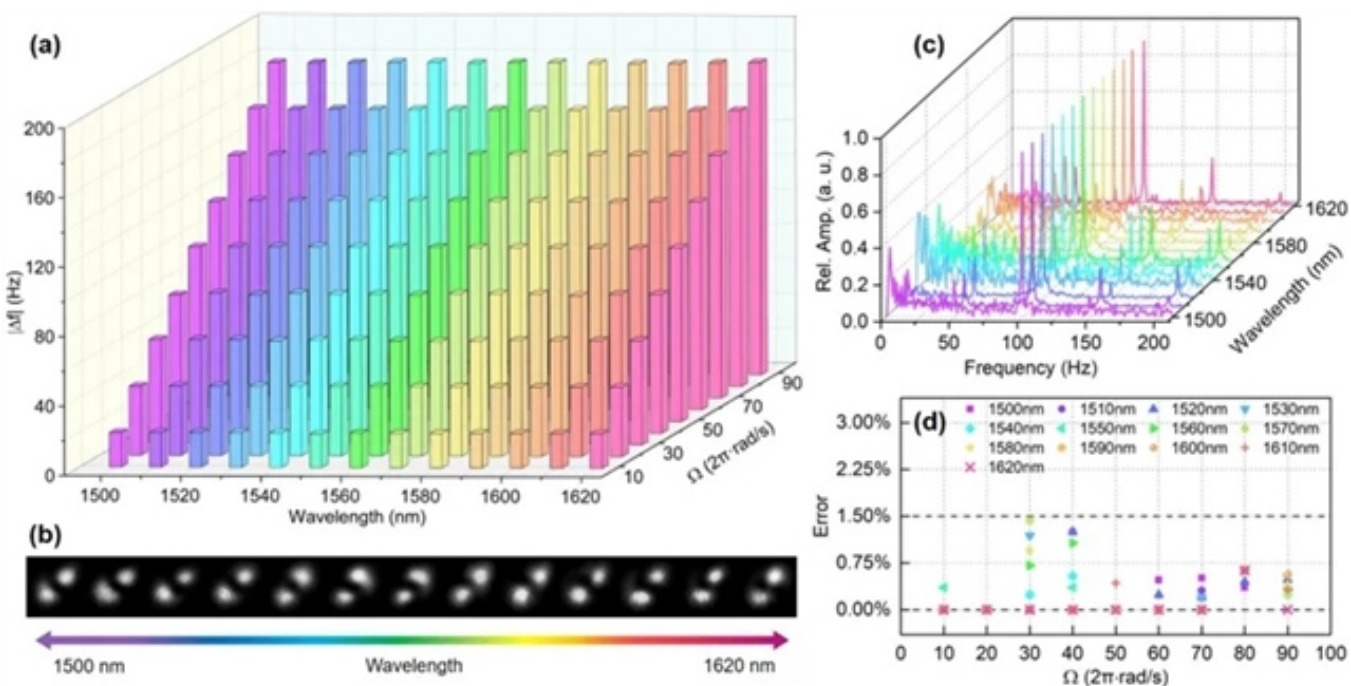


图2. 全光纤旋转多普勒测速技术的实验测试结果。

总结展望

本研究在运动测量技术上实现了重大突破，研发了首款全光纤旋转多普勒测速系统。该系统具有收发一体和超宽带工作的特点，具有集成度高和低成本的优势，有望提供一种小型化的新型光学测量工具，在物理、生命科学及工业生产中具有广阔的应用前景。在未来的研究中，作者团队将对全光纤旋转多普勒测速技术进行优化和更广泛的应用验证。比如，将开发高阶模式选择耦合器，以提升系统的测量精度。此外，系统的封装与外场测试也是关注的重点，以确保其在实际应用中的稳定性和可靠性。其目标为，使AF-RDV技术在光学测量领域发挥最大潜力，为多场景的运动监测提供更加高效的解决方案。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01747-8>

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：王健等 来源：《光：科学与应用》

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

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