
瞬态布里渊光纤传感：为真空管道植入“光学神经末梢”

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/36303.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！

瞬态布里渊光纤传感：为真空管道植入“光学神经末梢”。导读

真空管道磁浮交通（evacuated tube maglev transportation, ETT）具有速度快、效率高、能耗低、噪声小等优点，被视为极具潜力的下一代轨道交通技术。然而，ETT超高的运行速度和特殊的真空环境也要求其必须配备全新的监测系统以实时感知管道全线基础设施状态，从而及时应对突发异常情况，保障列车安全平稳运行。

近日，西南交通大学信息光子与通信研究中心团队提出了基于分布式瞬态布里渊光纤传感（TABS）的多维高分辨真空管道状态感知技术。深入研究了瞬态声波下受激布里渊散射的作用过程，设计了一种功能协同传感器架构以高效利用瞬态声波的宽带、时变能量转换特性，进而有效提升布里渊能量利用率和整体传感性能。最后，深入探索了基于TABS的真空管道磁浮交通系统关键基础设施多维状态感知的可行性，为未来真空管道实时监测迈出了关键一步。

该成果以High-spatiotemporal-resolution distributed Brillouin sensing with transient acoustic wave为题发表在国际顶尖光学期刊《Light：Science Applications》，论文第一作者为西南交通大学博士、清华大学博士后周银，共同第一作者为上海交通大学程远副教授，通讯作者为西南交通大学闫连山教授。

研究背景

真空管道磁浮交通是一种融合磁悬浮与真空管道技术以克服轨道摩擦力与空气阻力影响的新型轨道交通技术，可在低功耗、低噪音下实现亚音速或超音速（ $\geq 1000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ）贴地飞行。超高的行驶速度虽能大幅提高运载效率，但同时也对线路稳定性和安全性提出了更高的要求。为保障列车安全，需对管道沿线关键基础设施状态进行实时监测以及时发现并应对随时可能出现的异常情况。然而，真空管道的高真空、全封闭、非透明、强电磁等特点决定了传统监测方式（如视觉、电学传感器）难以对真空管道全线状态进行多样而细致的检测。

根据真空管道磁浮交通的特点，要实现其实时状态的精细检测，传感系统应具备以下能力：1）长探测距离，可实现几十到几百千米的探测范围；2）高空间分辨，可实现米至厘米级的伤损定位精度；3）高时间分辨，可对突发异常事件快速响应；4）高通用性，可对温度、应变、振动、真空等多维信息进行探测；5）强极端环境适应性，可在高真空、强电磁环境中长期稳定运行。鉴于此，该研究团队提出了基于瞬态声波的布里渊光时域分析仪传感系统以实现高时空分辨率分

布式感知并探索其在真空管道多维状态监测中的可行性（图1），展示了其在开放世界大规模智能感知方面的应用潜力。

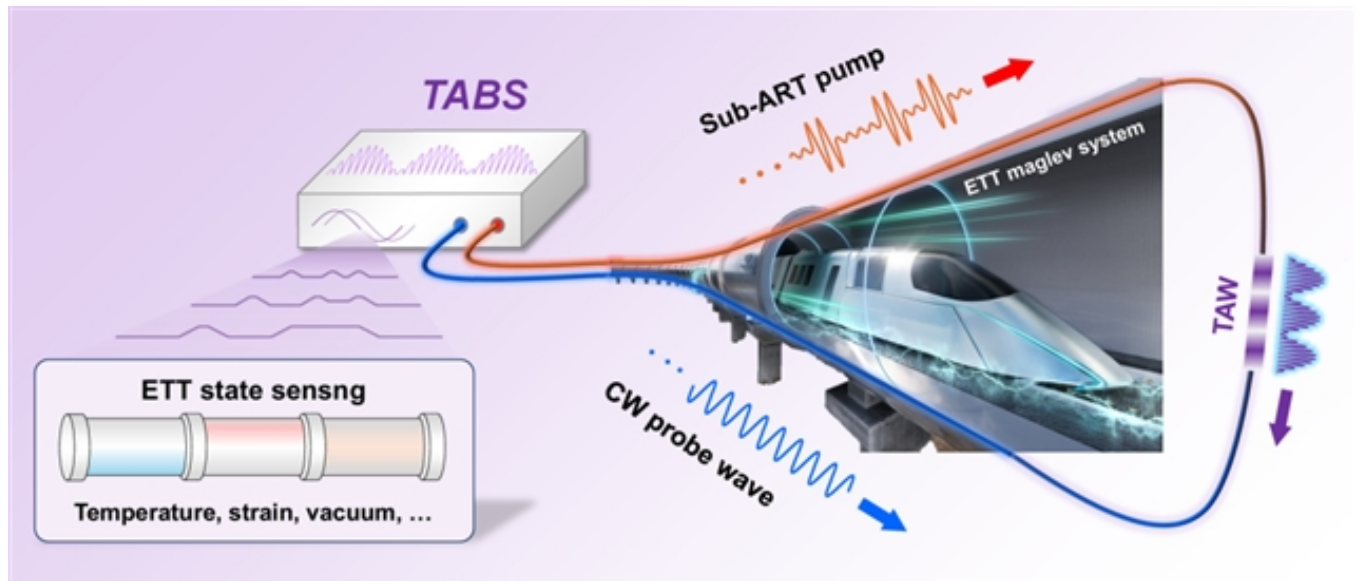


图1. 基于分布式瞬态布里渊光纤传感的真空管道磁浮交通系统多维状态感知技术。TABS：基于瞬态声波的布里渊光时域分析仪传感器, ART: 声波响应时间, TAW: 瞬态声波, ETT: 真空管道。

研究内容

首先，为实现长距离、高时空分辨率分布式感知，作者们提出了基于瞬态声波的布里渊光时域分析仪传感器（Transient Acoustic wave-based Brillouin optical time domain analysis Sensor, TABS）。

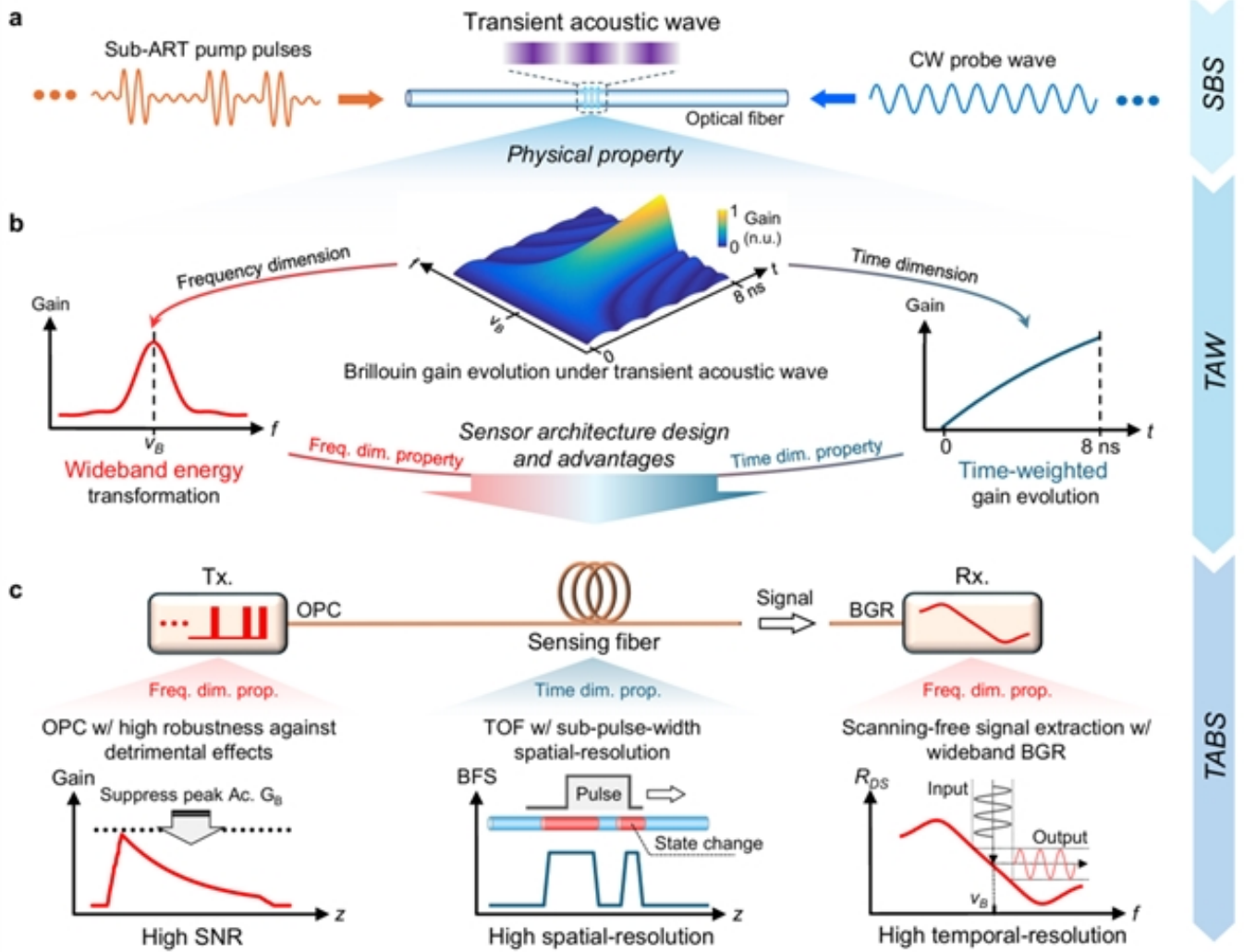


图2. 基于瞬态声波的布里渊光时域分析仪传感器（TABS）的工作原理。(a) 受激布里渊散射作用过程。ART：声波响应时间。当泵浦光与探测光相互作用时间小于10ns时，声波处在瞬态。SBS：受激布里渊散射，TAW：瞬态声波。(b) 瞬态声波下的能量转换特性。n.u.: 归一化单位, v_B : 布里渊频移, Freq. dim.: 频域。(c) 功能协同传感器架构设计。Freq. dim. prop.: 频域特性, Tx: 发射机, Rx: 接收机, OPC: 光脉冲编码, Ac. GB: 累积布里渊增益, TOF: 飞行时间定位法, BGR: 布里渊增益比值, SNR: 信噪比。基于瞬态声波的宽带、时变能量转换特性设计传感器架构，使各部分功能间协同互补，克服关键传感性能间相互制约，实现长距离、高时空分辨率传感。

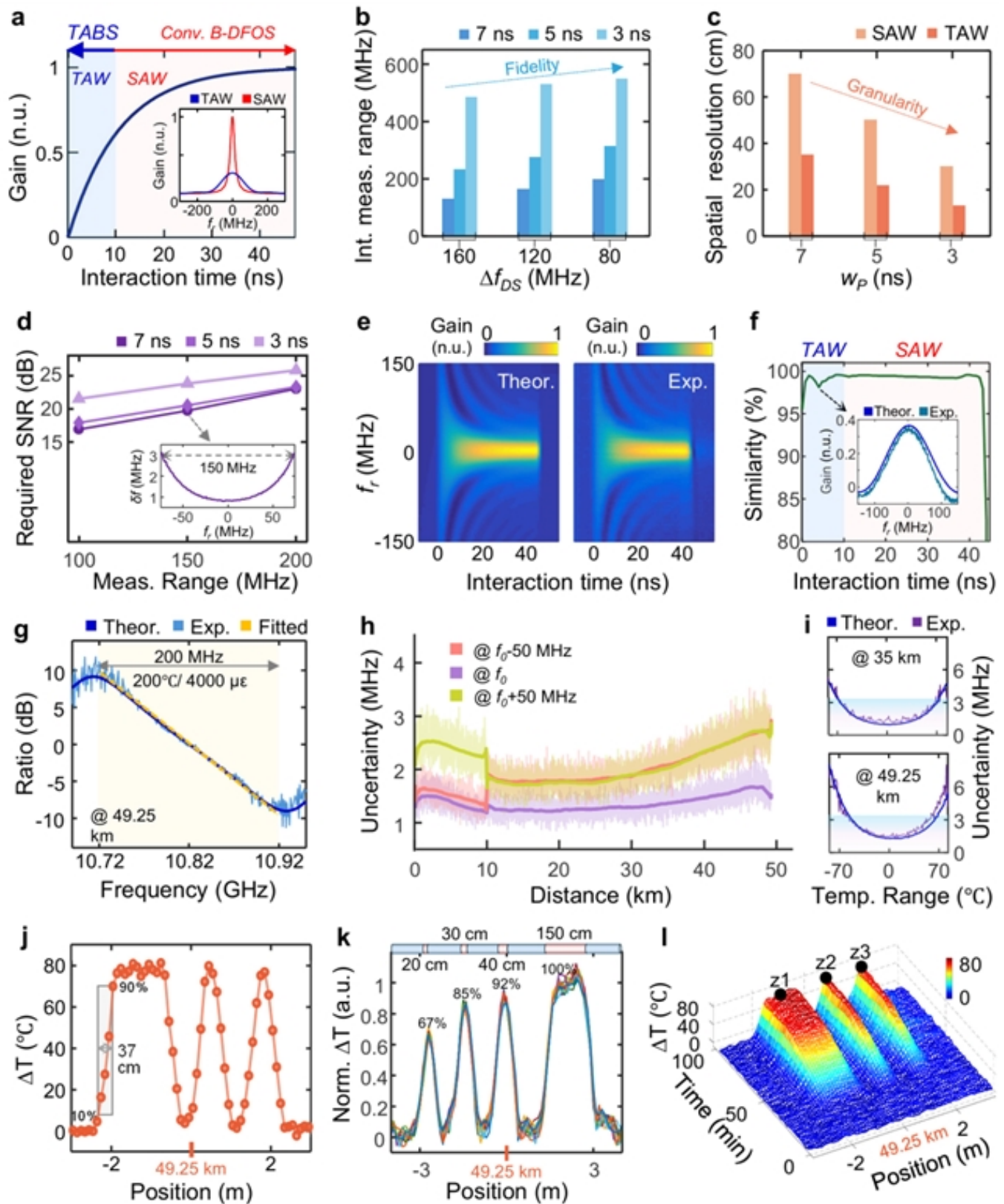


图3. 基于瞬态声波的布里渊光时域分析仪传感器（TABS）的物理特性及传感性能。

布里渊光分析仪是一种基于光纤中受激布里渊散射效应（SBS，一种涉及对向传输双光波与声波间的三波耦合作用）的分布式光纤传感技术，具有传感距离长、长期稳定性好、测量范围大、传

感参量多等优势。三十余年来，几乎所有布里渊光分析仪传感器都工作在稳态声波下以获取具有高频谱分辨率的窄布里渊增益谱。然而，稳态声波的使用同时也带来了集中而剧烈的能量输运过程，极易诱发各种不利效应而限制布里渊能量利用率，进而导致不同传感性能间相互制约，难以在长距离下实现高时空分辨率感知，这阻碍了其在真空管道和其他动态场景中的应用。同时，由于瞬态声波的宽布里渊增益谱具有更低的频谱分辨率，因此并未在布里渊传感器中得到广泛的应用。综上所述，为进一步实现整体性能的提升，需从布里渊传感器根本物理机制（即声波激发）出发，重新考虑传感系统的设计思路以提升布里渊能量利用率。

在该研究中，作者们深入分析了在瞬态声波下的受激布里渊散射作用，发现在该声波状态下布里渊能量输运呈现出了与稳态声波截然不同的宽带、时变特性。他们设计了一种功能协同传感器架构（图2）高效利用瞬态声波的宽带、时变能量转换来抑制系统寄生不利效应并提升布里渊能量利用率，进而提高整体传感性能。实验结果（图3）表明，TABS可在约50千米传感距离下实现37厘米空间分辨率和相较传统方法1到2个数量级提升的时间分辨率。测量速度的显著提升赋能高空分辨率布里渊传感由静态测量向动态感知转变，从而使管道状态高速探测、突发事件快速响应、自然灾害超前预警等成为可能。巧合的是，TABS这个简称正好与keep tabs on ...（译为密切关注、追踪某事动态）相呼应，预示其为感知而生。

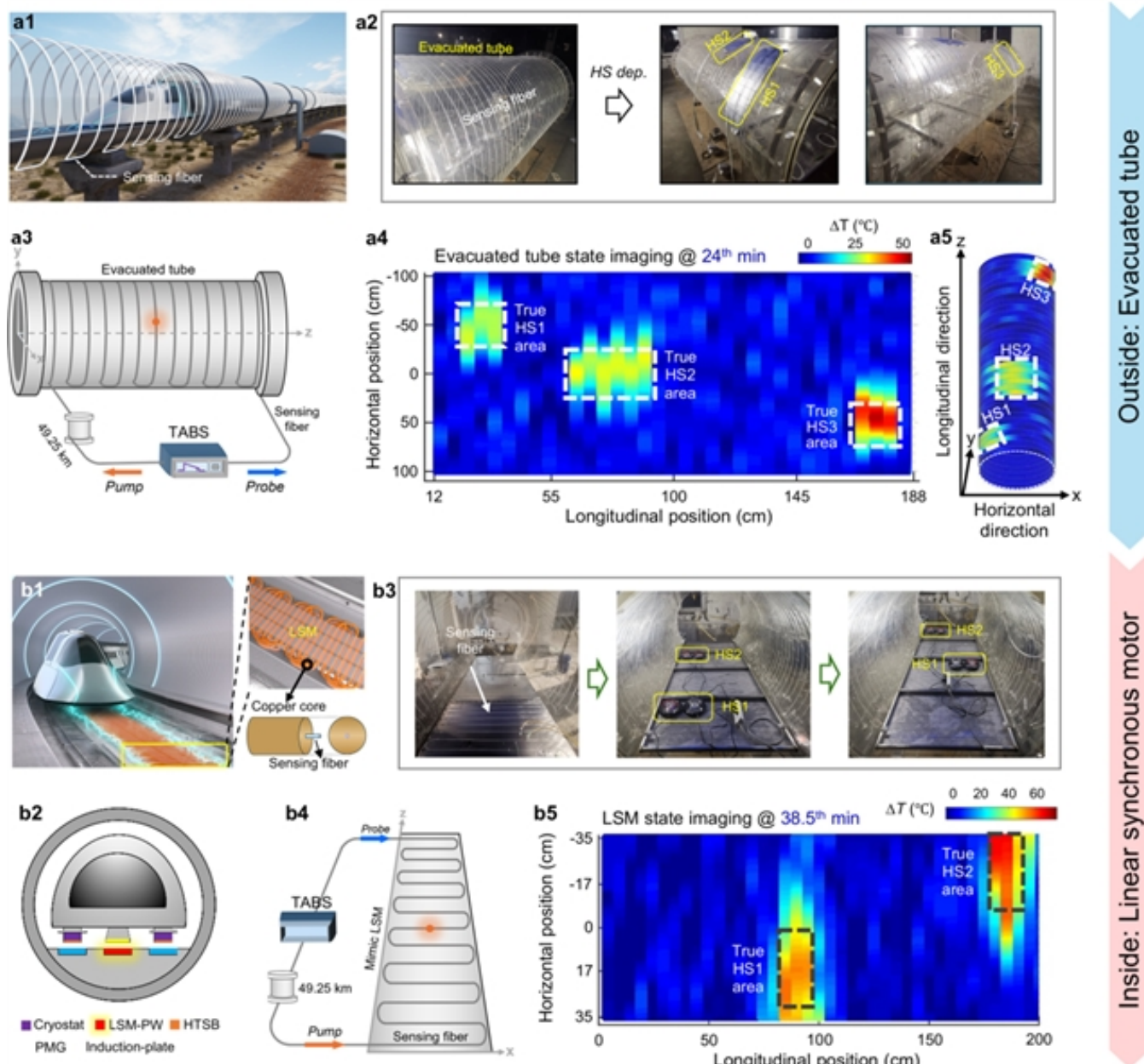


图4. 基于分布式瞬态布里渊光纤传感的真空管道关键基础设施状态成像。(a1-a5) 对真空管道状态的三维成像。中心点定位误差 (x-、y-、z-方向) 分别为6.94厘米、2.75厘米、0厘米。(b1-b5) 对模拟同步直线电机温升的二维成像。中心点定位误差 (x-、z-方向) 分别为3厘米、2.5厘米。

TABS的长距离、高时空分辨率、多参量感知能力结合光纤自身特性（如无源、低损耗、小尺寸、易嵌入或贴近待测物、抗电磁干扰等）使之较为契合真空管道多维状态检测的需求。进一步地，作者们探索了TABS对真空管道系统关键基础设施状态成像的可行性。在真空管道系统中，管道管体是维持内部真空环境的关键气密性机构（图4a1）。由于其长期承受外界温度、大气压力、附加力等因素的影响，因此极有可能出现疲劳、损伤、老化、变形等问题。对真空管道状态的实时监测是确保其结构长期健康的重要一环。在该研究中，他们将传感光缆布设于试验真空管道上，探索了通过光纤传感实现管道状态三维成像的可行性（图4a2-4a5）。实验结果表明，TABS以小于7厘米的中心坐标误差对管道状态进行了精确成像。

此外，真空管道内部的同步直线电机是驱动列车运行的关键电磁力机构（图4b1, 4b2）。同步直线电机由布设于地面的初级绕组和固定于车辆下方的次级永磁体（感应板）组成。初级绕组通电后产生移动磁场驱动列车运行。驱动列车所需的巨大功率和真空管道内部极弱的空气散热能力使初级绕组较易出现温升情况，威胁直线电机安全和列车运行稳定。在该研究中，作者们探索了通过光纤传感实现同步直线电机二维温升成像的可行性（图4b3-4b5）。鉴于初级绕组折返布设方式，实验中传感光缆以折返式布设于模拟直线电机之上。实验结果表明，TABS以小于3厘米的中心坐标误差对模拟电机温升进行了成像。

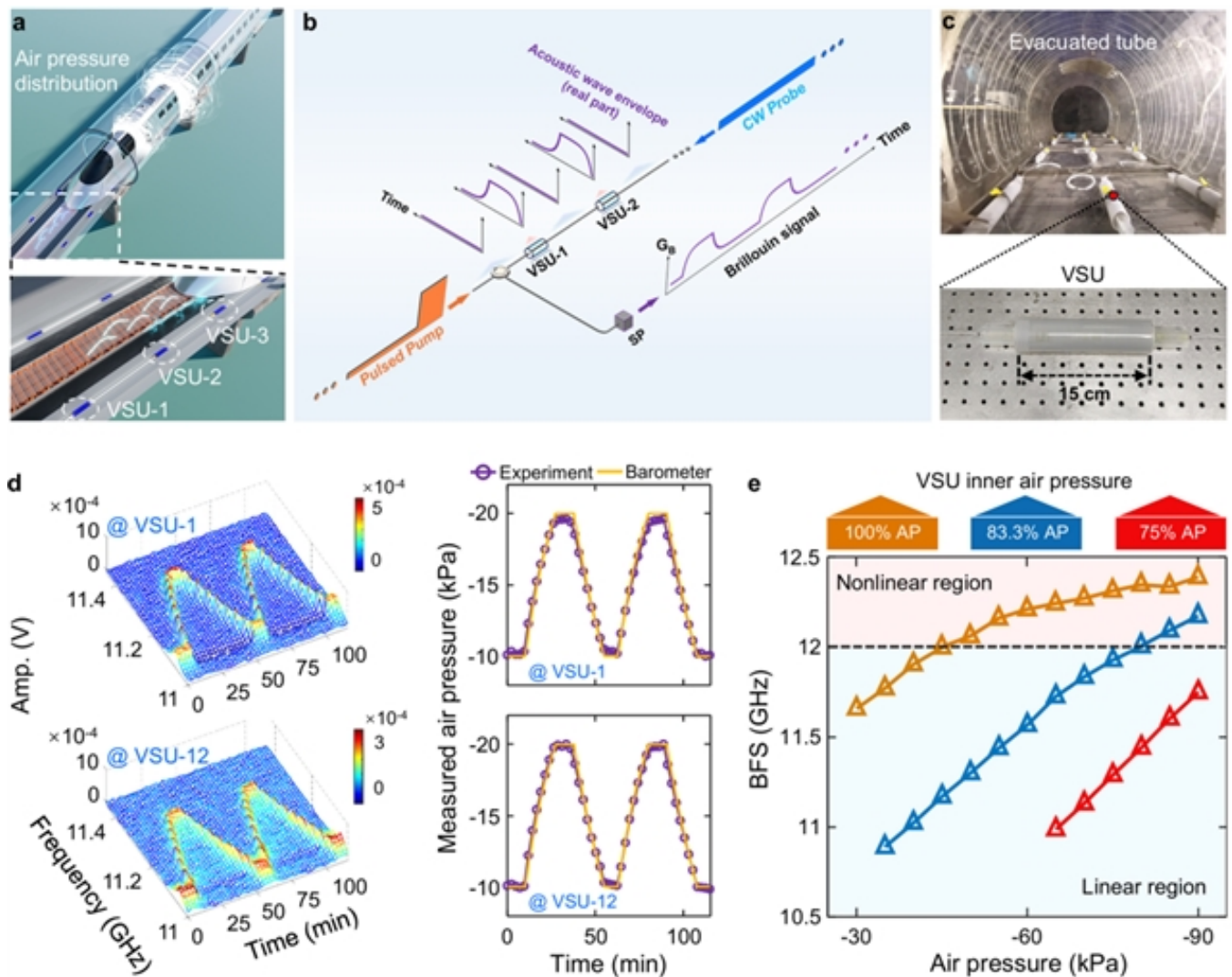


图5. 基于真空敏感阵列的分布式布里渊真空度传感。(a) 概念图。(b) 工作原理图。(c) 实验现场照片。(d) 动态真空度变化的测量结果，真空分辨率达33.3Pa，可与商用精密气压表分辨率相媲美。(e) 不同内部气压下真空敏感单元的量程。

除上述对有形目标的检测外，该工作还探索了管道真空度分布式测量的可行性。由于气动阻力随列车速度的二次方增长，因此真空度分布的不均匀性将引起亚音速或超音速行驶列车的抖动、发热甚至形变，威胁列车安全和稳定（图5a）。为实现对管道内部真空度分布的精准测量，作者们提出了一种基于真空敏感阵列的分布式布里渊真空度传感方案。在该方案中，真空敏感阵列由级联的真空敏感单元组成，目的是将真空度变化转换为光纤局部应变变化，同时结合受激布里渊散

射独有的频率选择特性，实现管道真空度的超空间分辨率分布式测量（图5b, 5c）。实验中，他们实现了气压分辨率达33.3 Pa的分布式真空度传感（图5d, 5e），该分辨率可与商用精密气压表分辨率相媲美。

总结与展望

该研究工作报道了一个充满希望的发现：长期被忽视的瞬态声波也许是开启高时空分辨率布里渊光纤传感的钥匙。

TABS的高时空分辨率探测能力将布里渊传感从静态测量推向动态感知，从而拓展其应用场景至自然灾害超前预警、基础设施结构健康实时评估等。此外，随着智能化的发展，TABS有望接入开放世界信息流，赋能智能设备更强大的环境感知与决策能力，为万物智联时代的来临提供助力。

该研究初步探索了利用瞬态声波时-频维度特性构建高性能分布式布里渊传感的方法，但其物理机制和潜在应用仍有待进一步挖掘。在未来，随着对瞬态声波研究的深入，相信会出现更先进的布里渊传感器、显微镜、集成光子器件等，为更多领域的发展注入新活力。

当前，对真空管道磁浮交通系统健康监测的研究仍处起步阶段。未来有望通过多模态融合（如温度变化、管体形变、真空度、机械波频率等）进一步提升真空泄漏检测及定位的准确度，以及对管道疲劳、老化与损伤的预测诊断能力。相信通过传感技术、材料科学、人工智能等多领域的跨学科合作，更先进的感知技术将被提出以更好地保障真空管道磁浮交通系统的安全。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01848-4>

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：闫连山等 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