

如何解决光学测量的散斑效应

及挚感光子 Qwave 技术介绍

背景介绍

散斑效应是一种光的干涉现象，指当激光或高度相干光照射到粗糙表面（如纸张、金属、生物组织等）时，反射或散射光在空间中形成的随机分布亮暗斑纹图案。其本质是光的相干叠加：粗糙表面的微观不规则性导致不同位置的反射光存在相位差，同时光不再是被反射，而是散射，当这些光在观察平面相遇时，会因相位叠加（相长干涉或相消干涉）形成明暗相间的斑点，看起来像是颗粒状，而且还会随着观察者的特定视角而发生变化。这是光学测量的一个普遍物理现象（图1）。实际上多普勒测振仪（或者其他基于相干测量的激光传感设备）的测试光斑是有一定尺寸的，这就导致了某些条件下光没有返回至光探测器，从而导致信噪比变差和信号失真。

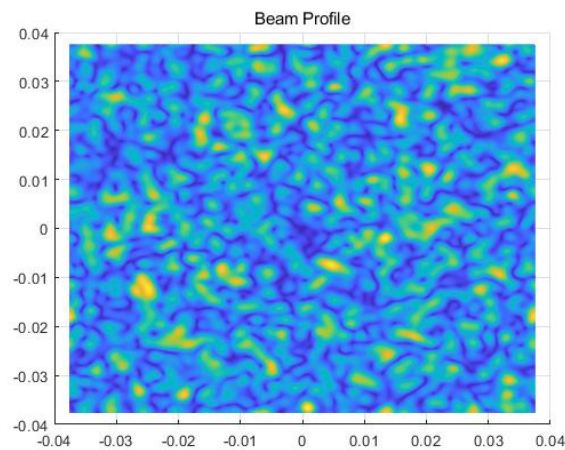


图 1 Speckle 现象

对光学测量的影响

散斑效应作为光的随机干涉现象，对 LDV（激光多普勒测速仪）测量产生多方面影响。其一，散斑效应的随机性使得测量中存在瞬时相位相消的概率，导致信噪比变差，对于依赖相位或多普勒频率解调的激光设备，会出现相位结果无效的奇异解，进而在相位或速度测量结果中呈现出毛刺现象（图2）。

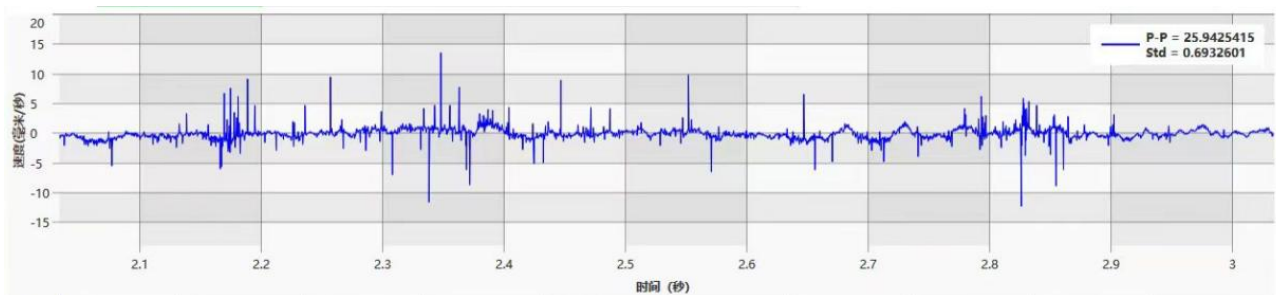


图 2 由于 speckle 现象造成的速度毛刺

当测量高温物体时，物体微观表面形状会随温度变化而改变，这种变化加剧了表面的不规则性，使得反射或散射光的相位差更为复杂，从而导致散斑效应显著增强，干扰 LDV 的稳定测量。同样在动态测量移动物体的场景下，测量光会快速划过物体微观粗糙表面，随着物体表面运动速度的提升，不同位置因微观不规则性产生的相位差干涉效应几率也随之增强，散斑效应进一步凸显，给 LDV 准确获取结果信息带来更大挑战。

散斑效限制了测量性能，比如以下几个典型场景：

1. 当用力锤敲击表面时，瞬时产生的加速度会使表面快速移动，导致反射光散斑效应随之快速变化，测量数据中可能出现大量毛刺，显著抬高了测量底噪，影响了测量的准确性与稳定性。
2. 对高温物体进行形变测量时，物体微观表面形状会随着温度不断变化，一旦表面状态变化使得大部分回光处于相位相消的时刻，就会出现长时间的低信噪比情况，使得测量信号淹没在噪声中，难以精确获取物体形变信息。
3. 在测量移动表面如高速轴承表面时，测量光在高速划过表面的过程中，不同位置的反射光会在极短时间内快速经历相长相消的变化，散斑效应变得异常剧烈，回光信号波动频繁，增加了准确捕捉和分析表面运动参数的难度。

解决方案

基于散斑效应的随机性特点，多家国外公司提出多通道加权测量方案（图 3）应对。像 Polytec 的 Qttec 方案 [1] 与 Sound&Bright 公司的 Quartet [2] 方案，其核心思路是借助多个测量通道协同工作。当某个通道因散斑效应导致测量性能下降时，其余通道能维持测量质量。据测量数据统计，采用 4 个通道可使信号丢失的累积概率降低 2000 倍以上[3]。

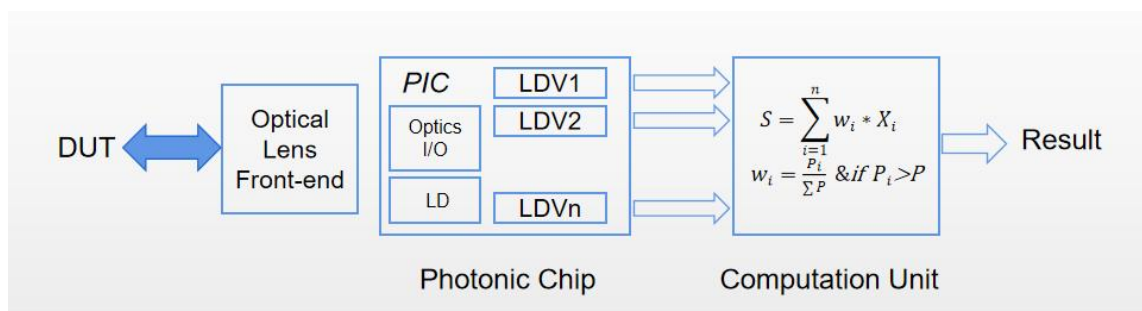


图 3 多通道加权测量方案及挚感光子芯片实现方案

然而，多通道测量存在明显弊端。在技术实现层面，光学系统结构变得极为复杂，成倍增加设计与搭建难度；为确保多通道测量点处于理想范围，对光学设计的精度要求近乎苛刻；系统解调过程也因通道增多而更为复杂。这些因素使得该方案成本剧增，导致全球仅有少数仪器制造商有能力实现，且相关设备系统复杂、售价高昂。

针对上述难题，挚感光子另辟蹊径，利用光学集成芯片实现光学传感。通过将多路光学相干检测光路、测距光路集成于单个芯片（图 4），并采用一体化封装，既满足了精密耦合的技术要求，又使设备体积缩小近百倍，制造成本大幅降低。其专有的 Qwave 方案，作为全球首个集成化光学测量解决方案，为散斑效应下的测量问题提供了更高效、经济的新途径。

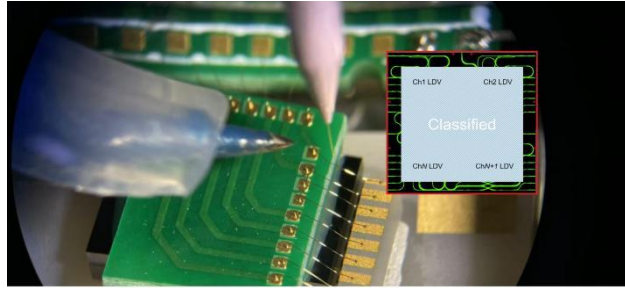


图 4 挚感光子 Qwave 光芯片

挚感光子 MotionQwave 产品

Motion Qwave 是挚感光子推出的新一代多通道激光多普勒测量仪，采用了最新一代挚感 Qwave 集成芯片，该芯片针对光学散斑效应优化设计，集成了多路 LDV 光传感芯片。经实际测量验证，在应对快速移动目标或高温目标时，能有效抵抗散斑效应，与传统 LDV 相比，Motion Qwave 结果有效性和测量底噪均实现显著提升。此外其内置子通道支持根据测量需求灵活配置。例如，可将 1 路通道专用于 FWC 精密测距，其余通道采用抵抗散斑效应算法，可以实现复杂场景下多维度测量需求的精准适配。

该系列产品特别适合快速移动或高温目标测量中，为工业检测、科研实验等场景提供更具针对性的高精度解决方案。如需了解更多配置细节，欢迎联系挚感光子销售团队获取专业技术支持。



图 5 挚感光子 Motion Qwave

参考文献：

[1]<https://www.polytec.com/cn/vibrometry/products/qttec-line>

[2]<https://soundnbright.com/quartet/>

[3] Schewe, M.; Rembe, C. Signal Diversity for Laser-Doppler Vibrometers with Raw-Signal Combination. Sensors 2021, 21, 998.

<https://doi.org/10.3390/s21030998>