

引用格式: YU Zhiwei, YIN Lei, NI Yubo, et al. Research on High Dynamic Range 3D Reconstruction Based on Parallel Single-pixel Light Transport Spectrum Correction[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(8):0812003

喻之为, 阴雷, 倪育博, 等. 基于并行单像素光传输频谱修正的高动态范围三维重建研究[J]. 光子学报, 2026, 55(8):0812003

基于并行单像素光传输频谱修正的高动态范围 三维重建研究

喻之为¹, 阴雷², 倪育博¹, 刘亚宁¹, 孟召宗¹, 高楠¹, 张宗华¹

(1 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401)

(2 中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

摘 要:为补偿传统图像处理导致的物理信息损失, 基于并行傅里叶单像素三维重建框架, 构建了一种面向频域分布特性的鲁棒估计及正则化修正方法。该方法通过对幅值与相位进行解耦式自适应去噪, 有效抑制了频谱域中的背景伪峰与噪声扰动; 在不增加硬件采样负担的前提下, 通过增强有效频域结构的可恢复性, 解决探测端非线性干预与光子噪声叠加诱发的频域测量失真。实验结果表明, 所提出的序列优化方案, 在低光子数与强反射共存的复杂环境中, 相比于传统数据处理模式显著改善了高反光区域的空洞缺失, 精度提升了 54.3%, 尤其在直接/间接反射交织的多峰场景中展现出优异的鲁棒性, 同时能够准确获取被测物纹理色彩信息。所提方法可作为现有高动态范围策略的强力物理补充, 为高价值目标的非接触精密测量提供兼顾底层物理一致性与高动态范围的新型技术方案。

关键词:并行傅里叶单像素成像; 高动态范围; 频谱正则化修正; 光传输系数; 三维重建

中图分类号: TH741

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20265508.0812003

0 引言

光学三维重建技术凭借高精度、高效率及非接触等优势, 已广泛应用于航空航天^[1]、工业检测^[2]及文化遗产数字化^[3]等领域。然而, 在实际应用中, 重建精度与效果依赖于被测物所处环境干扰与被测物自身表面特性。以复杂的文物数字化场景为例: 应用环境层面, 复杂光照诱发的多次反射, 以及玻璃罩、水汽等环境介质干扰, 显著增加成像过程的不确定性; 表面属性层面, 金属或陶瓷^[4]的高反射率易形成局部强反光, 石窟壁画^[5]丰富的纹理色彩则进一步加剧了场景的亮度差异。上述干扰因素在成像过程中交织叠加, 对探测端提出了严峻的动态范围挑战, 成为制约光学三维重建技术在复杂条件下实现高精度应用的核心瓶颈。

单像素成像通过投影光场调制与光强探测, 结合计算重建获取场景信息, 为复杂反射条件下的三维形貌测量提供了区别于传统相机成像的技术路径。其中, 傅里叶单像素成像 (Fourier Single-pixel Imaging, FSPI) 因兼顾成像质量与效率^[6], 已在直接/间接光检测、隔火^[7]、隔毛玻璃探测等场景中取得良好效果^[8]。JIANG Hongzhi 等^[9]进一步引入光传输矩阵思想与多步相移/多亮度投影技术, 有效抑制了三维重建中的强反光与多次反射干扰; LYU Nenqing 等^[10]与 NI Yubo 等^[11]则分别针对高浊度水下探测和欠曝光下的高动态范围 (High Dynamic Range, HDR) 三维重建提出了优化方案。然而, 现有研究基本建立在探测端具有理想线性响应假设的基础上, 忽视了投影畸变、拍摄图像压缩等非线性环节引发的额外光线偏移。此外, 现有的 HDR 重建方案往往依赖多曝光^[12]或多亮度技术^[13], 增加了重建算法的复杂度。如果降低曝光以抑制过曝, 或者面对本身就具有低反射率的物体^[14]、低光场景^[15]等, 极易导致非过曝区域信噪比 (Signal-to-noise Ra-

基金项目: 国家自然科学基金(U2341275, 52505598), 河北省自然科学基金(E2024202121)

第一作者: 喻之为, 15738867478@163.com

通讯作者: 高楠, ngao@hebut.edu.cn

收稿日期: 2026-03-01; **录用日期:** 2026-07-13

<http://www.photon.ac.cn>

tio, SNR)过低,甚至无法提取有效信号,限制动态范围的下限。

基于上述考量,本文依托成熟的相机CMOS探测平台,旨在规避其传统图像信号处理(Image Signal Processing, ISP)链路带来的非线性干扰,从传感器底层的原始线性响应信号出发,深入探讨结构光场在探测端的亮度演变规律。结合傅里叶单像素成像框架,系统分析了不同光子入射条件对原始光电信号重构性能的影响规律,并重点讨论了微弱光场下噪声引发的频谱退化特性及其对重构保真度的扰动机制。在此基础上,提出一种基于频谱统计特性的鲁棒估计与正则化约束算法,显著提升了低光子条件下的重建信噪比,并最终应用于复杂反射特性物体的HDR三维形貌重建,为复杂环境下光学精密测量提供了更为可靠的物理基础。

1 原理

1.1 并行傅里叶单像素三维重建原理

并行傅里叶单像素成像在投影端向场景投射一组具有预设空间频率与相位关系的周期性正弦条纹,同时在探测端,CMOS相机的每一个物理像素均被视作一个独立的单像素探测器,同步记录随投影相位变化的调制强度信号。通过对多帧观测序列进行线性组合精准解调各像素对应的傅里叶系数,进而在频域内还原该像素接收到的结构光场属性。

为此,首先对场景的光场调制过程进行建模。在空间频率 $k = (f_x, f_y)$ 及第 m 个相移步对应的相移量 ϕ_m 下,投影到物体表面的正弦调制光场可表示为

$$P_{k,m}(x, y; f_x, f_y, \phi_m) = a + b \cos(2\pi f_x x + 2\pi f_y y + \phi_m) \quad (1)$$

式中, a 为平均光强; b 为对比度; $m = 1, \dots, M$,通常取 $M = 4$ 。

在实际系统中,相机探测器同时获取空间上多个像素的响应,对相机像素 (x_c, y_c) 制响应可表示为

$$I_{k,m}(x_c, y_c) = O(x_c, y_c) + \beta \iint R(x, y) P_{k,m}(x, y; f_x, f_y, \phi_m) h(x, y; x_c, y_c) dx dy \quad (2)$$

式中, $O(x, y)$ 为相机像素 (x_c, y_c) 的环境光辐亮度, β 为响应因子, $h(x, y; x_c, y_c)$ 表示调制过程中的空间传递关系。

通过对同一频率点 k 的多步相移探测值进行正交差分解调,可估计其对应的傅里叶系数。以四步相移为例,有

$$\hat{F}(k) = (I_{k,1} - I_{k,3}) + i(I_{k,2} - I_{k,4}) \quad (3)$$

对每一个相机像素独立完成傅里叶系数估计得到各自对应的傅里叶频谱,通过逆傅里叶变换重建为投影仪像素对该相机像素的光传输系数分布,即

$$h(x, y; x_c, y_c) = \mathcal{F}^{-1}\{\hat{F}(k)\} \quad (4)$$

由此,每个相机像素都能并行地恢复一幅投影平面上的光传输响应图,进而建立投影仪像素 (x, y) 与相机像素 (x_c, y_c) 的对应关系,结合三角测量恢复三维点云。与传统条纹投影轮廓术(Fringe Projection Profilometry, FPP)与格雷码特征匹配相比,这种三维重建方法将几何对应关系隐式编码在频域解调与光传输定位之中,避免了传统方法中引入的空间一致性假设与后处理匹配开销,映射建立更直接、并行度更高,且对表面纹理缺失或材质拼接的依赖更弱,从而为高精度三维重建提供了新的实现路径。

然而,上述优势建立在一个隐含前提之上:探测值必须能够准确反映式(2)中的调制响应。实际系统中,探测端并非理想线性测量链路,常见的探测输出可归纳为三类:相机ISP输出、相机RAW输出以及软饱和响应输出^[16],如图1所示,分别对应于不同的非线性映射、截断方式与噪声传播路径,从而导致不同的 $h(x, y; x_c, y_c)$ 失真机理。

以一个像素阵列对场景进行观测,在曝光时间 t 内,某一像素位置 (x_c, y_c) 处接收到的光子数 N 服从泊松分布^[17],建模为

$$N(x_c, y_c) \sim \text{Poisson}(\Phi(x_c, y_c)\eta t) \quad (5)$$

式中, η 为量子效率, $\Phi(x_c, y_c)$ 为期望入射光子通量(photons/s)。此过程为所有探测方式的共同物理起点,不同探测模型之间的差异体现在光子计数到像素输出之间的映射关系。

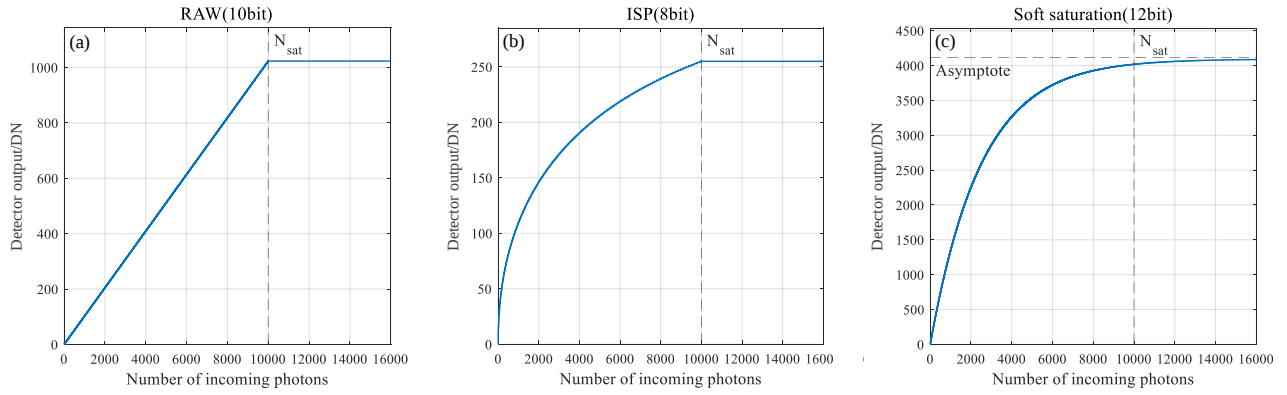


图1 三种探测方式的响应曲线。(a)相机RAW探测,达到饱和前表现为线性;(b)相机ISP探测,达到饱和前为非线性;(c)软饱和探测,渐进地接近极限

Fig. 1 Response curves for three detection methods. (a) Camera RAW detection, which is linear before reaching saturation; (b) Camera ISP detection, which is nonlinear before reaching saturation; (c) Soft saturation detection, approaches the limit gradually

相机拍摄时,CMOS将光信号转换为数字信号,在未发生饱和的情况下相机探测到的亮度与光照强度呈线性关系(如图1(a)),此时输出为RAW格式数据:

$$I_{k,m}^{\text{RAW}} = g(N + \sigma_r + \sigma_d) \quad (6)$$

式中, g 为相机增益;观测噪声可用泊松-高斯过程建模^[18], $\sigma_r \sim N(0, \sigma_r^2)$ 为读出噪声, $\sigma_d \sim \text{Poisson}(Dt)$ 为暗电流 D 引起的暗噪声。

通常拍摄得到的RGB图像为RAW格式数据,在相机内部经过ISP的输出,包含非线性响应映射、伽马校正、压缩等。相较于RAW格式数据所代表的线性探测,ISP过程对整幅图像进行了处理,破坏了光子探测的泊松模型,改变了相移序列的幅度比例与相位关系,使式(3)中的傅里叶系数估计不再对应真实的频域采样,从而在构建的频谱中引入结构性扰动,进一步影响光传输重建稳定性。软饱和探测模型常见于传统单像素光电二极管、光电倍增管或单光子计数器等传感器件,可用指数或对数趋近响应近似描述,采用一种单调渐近响应形式来描述像素输出与入射光子数之间的关系。如图1(c)所示,在高光子入射区不会发生硬截断,具有极高的动态范围;在低光子入射区其靶面又可以接收更多的光子数,具有更好的信号分辨能力。但是其探测机制与硬件实现通常更为复杂,为恢复为线性需要额外标定逆映射,且在并行高分辨率测量中可能受到有效像素规模、靶面结构和系统集成方式的限制。当前并行单像素三维测量研究以相机直接拍摄的RGB图像为基础,多以强全局光、强互反射或复杂材质场景为切入点,利用并行单像素技术获取光传输响应,以缓解传统条纹测量在互反射、图像质量不佳等条件下的失效,同时提高了重建结果的动态范围。

而在本文关注的低反射率材料、照明受限、低曝光以抑制过曝测量等场景中,探测不可避免地进入低光子数区间。此时,由于有效信号的减弱,频谱失真的主导因素将从饱和截断转向噪声对频谱观测的影响机制,并进一步决定三维光传输系数分布,成为制约复杂反射场景下HDR下限的瓶颈。相较于经ISP处理后的图像,传感器输出的原始线性响应更便于保持四步相移观测之间的幅值对应关系,并使噪声传播路径具有较清晰的物理解释,相较于软饱和探测硬件限制更小,因此更适合作为后续频谱建模与修正的输入,将HDR的可用下限向更弱信号延展,从而提升三维重建的整体可用动态范围。

1.2 频谱正则化修正方法

在低光子数入射条件下,式(5)所提泊松分布的光子噪声相对信号的比例大幅增加,使傅里叶系数的整体估计发生了较大的偏差,进而在重建的 $h(x, y; x_c, y_c)$ 中表现为直接光照峰位置随噪声与频谱异常发生偏移和误检,导致相机与投影仪像素对应关系不稳定。针对这一类由原始线性观测噪声主导的频谱退化,提出了一种基于多维先验的频谱正则化修正方法,在未经相机内部非线性处理的原始响应RAW数据基础上,以 $F(k)$ 为核心待估变量,构建了包含鲁棒数据一致性、噪声约束的幅值先验及空间连续性先验的联合正则化框架,并通过逐步求解形成可实现的三步频谱修正链路。图2为所提方法的流程图,具体修正过程可以总结为以下三步:

- 1)对异常观测值进行鲁棒解调与去偏置,获得频点权重。
- 2)在频域进行幅相解耦,构建收缩掩膜,抑制不可靠频点的幅值贡献。
- 3)对系统频域衰减进行正则化约束下的反卷积补偿,构建全局增益,提高主峰能量集中度并恢复峰形锐度。

所提方法频谱修正联合目标可表示为

$$\hat{F} = \arg \min_F \mathcal{L}_{\text{data}}(F; I) + \lambda_a \sum_k \psi \left(\frac{|F_1(k)|}{\hat{\omega}(k)} \right) + \lambda_d \sum_k \|H(k)F(k) - F_2(k)\|_2^2 \quad (7)$$

式中, $\mathcal{L}_{\text{data}}$ 表示基于四步相移探测的鲁棒数据一致性,该项为步骤1(STEP1); $\psi(\cdot)$ 为对幅值的保相位正则项, $\hat{\omega}(k)$ 为频率点 k 的稳健噪声尺度,该项为步骤2(STEP2); $H(k)$ 为系统频域衰减模型,等效于低通,并在正则约束下实现稳定补偿,该项为步骤3(STEP3)。该目标在实现上分别对应稳定观测、噪声抑制、系统衰减补偿的修正路径。

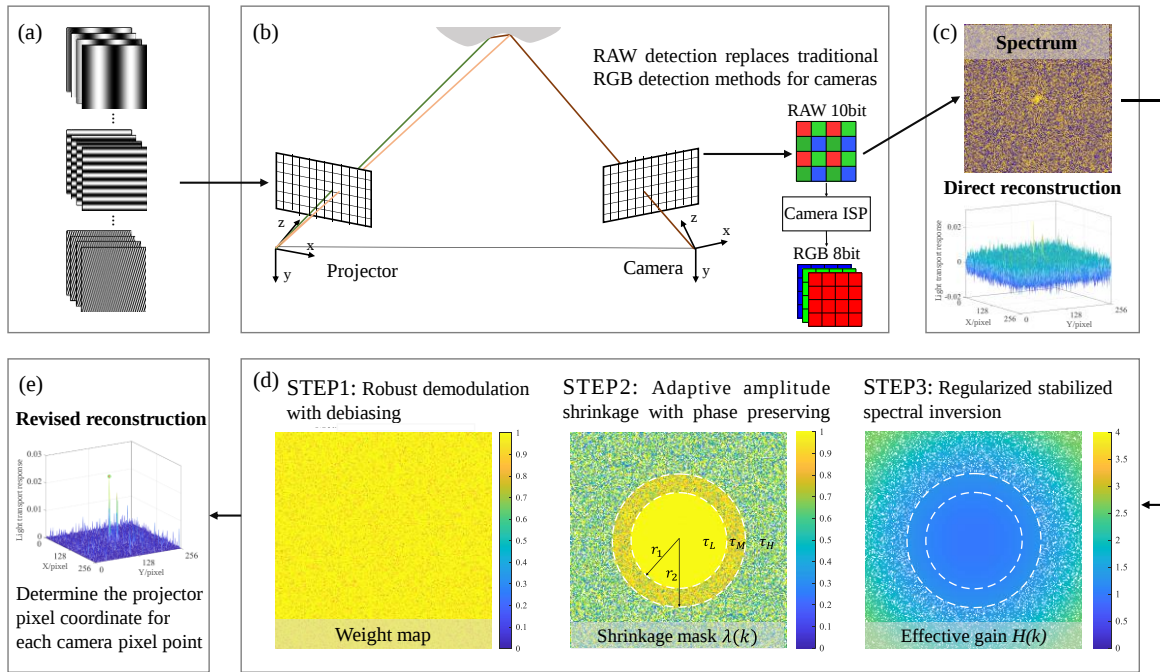


图2 本文所提出的频谱修正方法流程

Fig. 2 Flowchart of the spectrum correction method proposed in this paper

- 1)鲁棒数据一致性估计:对每个频率 k , 设 $\theta_k = [a_k, c_k, s_k]^T$, 则 $\hat{F}_0(k) = 2(c_k + is_k)$ 。令

$$X = \begin{bmatrix} 1 & \cos 0 & \sin 0 \\ 1 & \cos \frac{\pi}{2} & \sin \frac{\pi}{2} \\ 1 & \cos \pi & \sin \pi \\ 1 & \cos \frac{3\pi}{2} & \sin \frac{3\pi}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$I_k = X\theta_k + \sigma_k \quad (9)$$

由于泊松噪声随机分布在每一个相移步,如图2(c),差分虽然一部分会相互抵消,但也易出现噪声同向叠加的现象,极大偏离真实傅里叶系数,并在逆变换后在光传输系数角点处出现伪峰。为了抑制噪声导致的结构性离群,为每个频点的参数建立如下鲁棒性优化模型:

$$\hat{\theta}_k = \arg \min_{\theta_k} \sum_{m=1}^4 \rho \left(\frac{I_{k,m} - x_m^T \theta_k}{\sigma_{k,m}} \right) \quad (10)$$

式中, $\rho(\cdot)$ 选用损失函数 Huber, 以抑制噪声叠加; $\sigma_{k,m}^2 \approx \max(I_{k,m}, 0) + \sigma_r^2$; x_m^T 为 X 的第 m 行。该问题通过

迭代重加权最小二乘求解,使得残差较大的相位步自动被降权,获得鲁棒估计。

仅靠鲁棒回归可显著降低离群相移步对傅里叶系数的影响,但对于噪声叠加频繁出现的情况,还需要进行结构性的去偏置。为此引入两个全局偏置基底:常量基底 $B_0(k) \equiv 1$ 和交替基底 $B_\pi(k) = (-1)^{u+v}$, u, v 为频域网格索引,两个基底分别对应全局偏置和Nyquist交替符号偏置,从而获得频谱整体偏置。

$$F_{\text{bias}}(k) = b_0 B_0(k) + b_\pi B_\pi(k) \quad (11)$$

$$\begin{cases} b_0 = \langle \hat{F}_0, B_0 \rangle / \langle B_0, B_0 \rangle = \text{mean}(\hat{F}_0) \\ b_\pi = \langle \hat{F}_0, B_\pi \rangle / \langle B_\pi, B_\pi \rangle = \text{mean}(\hat{F}_0 \cdot B_\pi) \end{cases} \quad (12)$$

$$\hat{F}_1(k) = \hat{F}_0(k) - F_{\text{bias}}(k) \quad (13)$$

2) 相位保持下的幅值正则:在鲁棒估计与去偏置后,进一步压制噪声底并提高频谱中弱贡献频率的可见性。对 $\hat{F}_1(k) = \hat{A}_1(k) \cdot \exp(i\varphi_0(k))$, 由于三维重建中定位主要依赖于光传输系数中光照点的位置稳定性,因此采用幅相解耦思想,保持相位 $\varphi_0(k)$ 不变、仅对幅值 $A_1(k)$ 施加自适应收缩,从而在压制随机噪声底的同时,避免引入额外的相位误差使相位信息承载的峰值位置被进一步破坏,即

$$\hat{A}_2(k) = \lambda(k) \hat{A}_1(k) \quad (14)$$

式中,收缩系数 $\lambda(k) \in (0, 1)$, 由探测值统计量驱动,对频带自适应。由于低频、中频、高频的信噪比结构不同,为此以归一化频率半径 $r(k)$ 将频谱划分为低 L 、中 M 、高 H 三段,并构造每个频点的幅值估计。

$$z(k) = \frac{\hat{A}_1(k)}{\hat{\omega}(k)} \quad (15)$$

$$\hat{\omega}_b = 1.4826 \cdot \text{median}(|e_b - \text{median}(e_b)|), b \in \{L, M, H\} \quad (16)$$

式中, $\hat{\omega}_b$ 是鲁棒解调残差的稳健尺度,一般取中位数避免离群; e_b 为前置解调的频带 b 内的残差向量, $e_b = I_k - X\theta_k$; 系数 1.482 6 是转换为高斯尺度的常数。

收缩系数采用保相位的软型收缩,表示为

$$\lambda(k) = \max\left(0, 1 - \frac{k_b^2}{z^2(k)}\right) \quad (17)$$

式中, k_b 为频带相关的目标收缩强度,依据频带信噪比分布特点,对低频段轻度抑制以减小背景起伏,中频段采用适中收缩以兼顾峰值定位与结构保持,高频段采用相对更强的收缩以抑制噪声主导分量,则 $k_L < k_M < k_H$, 并通过网格搜索确定一组参数区间,分别取 0.06、1.3、2.8。由此得到收缩后的频谱,即

$$\hat{F}_2(k) = \hat{A}_2(k) \cdot \exp(i\varphi_0(k)) \quad (18)$$

3) 正则约束下的反卷积补偿:即使通过前两步进行了一定去噪,避免重建的光传输系数中噪声压过直接光照点的峰值,但是无法解决光传输过程导致的高频衰减及剩余噪声,此时的频谱近似为

$$F_2(k) \approx H(k)F(k) + N(k) \quad (19)$$

式中, $H(k)$ 是系统的频域传递函数,表示等效低通衰减, $|H| \in [0, 1]$; $N(k)$ 是剩余噪声项。目的为从收缩后的频谱 F_2 中估计未衰减频谱 F , 并通过正则化抑制反演带来的噪声放大,以提升信号强度并进一步减小噪声,对每个频点可写为带正则的二次问题。

$$\hat{F}_3(k) = \arg \min_{F(k)} |H(k)F(k) - F_2(k)|^2 + \partial(k) |F(k)|^2 \quad (20)$$

式中, $|HF - F_2|^2$ 为数据一致项,要求反演后的频谱经系统衰减后要尽量贴近观测谱; $\partial|F|^2$ 为与置信度相关的正则项,抑制反演带来的无意义的能量放大,正则强度 $\partial \sim 1/z_H$ 。该问题有闭式解,即

$$\hat{F}_3(k) = \frac{H^*(k)}{|H(k)|^2 + \partial(k)} F_2(k) \quad (21)$$

$$H(k) = \exp(-\alpha R^2(k)) \quad (22)$$

式中, $R(k) \in [0, 1]$ 是归一化频率半径; α 是衰减强度参数,根据观测的幅值径向统计来估计。由于中频区域内真实频谱的径向变化相对平缓,因此可以通过对 $\log A_2$ 与 R^2 做稳健线性拟合估计 α , 取对数:

$$\log A_2(k) \approx -\alpha R^2(k) + \gamma \quad (23)$$

式中, γ 为拟合截距, 为常数; 获得的斜率取负数即为衰减强度参数 α 。

对每个相机像素, 完成以上三步后获得最终频谱, 通过逆变换重建得到光传输系数 $h(x, y; x_c, y_c)$, 如图 2(e), 实现低光子数条件下的高精度三维重建。

与常见频域或稀疏正则化问题中的图像质量恢复不同, 所提方法以并行单像素三维重建中的光传输频谱为恢复对象, 核心目的是实现光照峰的准确定位。传统 Wiener/Tikhonov 类方法通常将频谱退化视为统一逆问题, 强调全局稳定恢复; 稀疏正则化方法则更多依赖某一变换域中的稀疏表示, 以整体恢复误差或采样压缩率为主要目标; 所提方法通过三步修正抑制噪声并进行系统补偿, 更关注于光传输频谱的物理可解释性以及后续三维几何定位的稳定性, 因此更具有针对性。

2 实验

2.1 非线性、饱和及噪声影响仿真实验

为验证不同入射光子条件及三种探测方式对重建结果的影响, 并为后续低光子数讨论与频谱正则化修正提供对照, 利用一幅亮度分布均匀、细节丰富的灰度数字图像构造 RAW 探测、ISP 探测、软饱和探测三种方式的重建结果观测。图像及投影条纹分辨率均为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。由于 RAW 探测的线性特性, 利用曝光时间的变化来代表入射光子数的调整。仿真中, 以 RAW 探测中最亮像素刚好达到饱和的曝光时间作为基准曝光, 记为 $t_0 = 1$, 并设置“低曝光”、“正常曝光”与“过曝”三类工作点, 来代表不同的光子入射条件。三种探测方式的输出位深分别设置为: ISP-8bit、RAW-10bit、软饱和-12bit, 此时最亮像素在 RAW 探测中的无噪探测值即为 $I_{\max} = 1023$, 重建频谱如图 3 所示。

在低光子数条件下, 三种探测方式下除了低频能量集中区域外均被噪声淹没, 频域观测置信度显著下降。在无饱和像素的正常光子数条件下, RAW 探测中由于具有足够的光子计数, 信号占据主导地位, 相位间的幅度差异能够稳定地反映调制信号的正弦关系; ISP 探测由于存在非线性映射, 频谱中出现可观测的高次谐波, 如图 3(g) 所示; 软饱和探测的大靶面使其在保持动态范围的同时获得与 RAW 探测相近或更好的重建质量。当场景因局部高亮进入过曝状态时, 入射光子数高于相机探测极限, RAW 探测的饱和硬截断使部分相位下的探测值被钳位到上限 $I_{\max}$, 被削顶的正弦波产生一系列结构性高次谐波, 使调制信号的能量从原本的基频位置泄漏到更高阶频率上, 使频谱结构产生明显变化; ISP 探测叠加非线性, 影响更加严重; 软饱和探测的渐进趋势避免了硬截断, 保留了更多有效相移信息, 与图 3(h) 对比, 图 3(i)、(j) 存在明显的高次谐波。仿真结果进一步证明动态范围的上限与下限均会对重建质量产生显著影响。

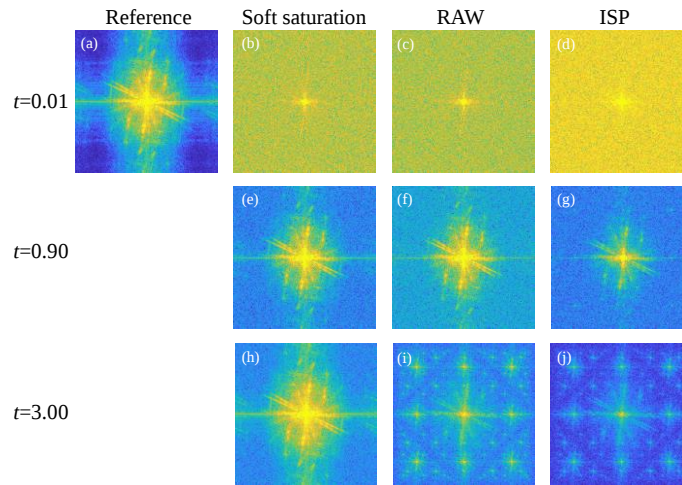


图 3 不同探测方式重建频谱。(a)参考频谱;(b)-(d)低曝光重建频谱;(e)-(g)正常曝光重建频谱;
Fig. 3 Reconstruct spectrum using different detection methods. (a) Reference spectrum; (b)-(d) Low exposure reconstructed spectrum; (e)-(g) Normal exposure reconstructed spectrum; (h)-(j) Overexposure reconstructed spectrum
(h)-(j)过曝光重建频谱

为验证上述非线性及饱和对光传输系数重建结果的影响,对单峰光传输系数进行仿真。该单峰光传输系数对应仅有一个直接光照点的反射情况, $t = 1$ 时当前相机像素的理想 RAW 探测值刚好达到位深上限。图 4 为不同曝光时间下三种探测输出构建的傅里叶频谱,随着过曝程度提高,频谱逐渐稀疏,重建的光照峰被图像中心处的扩散光斑取代。

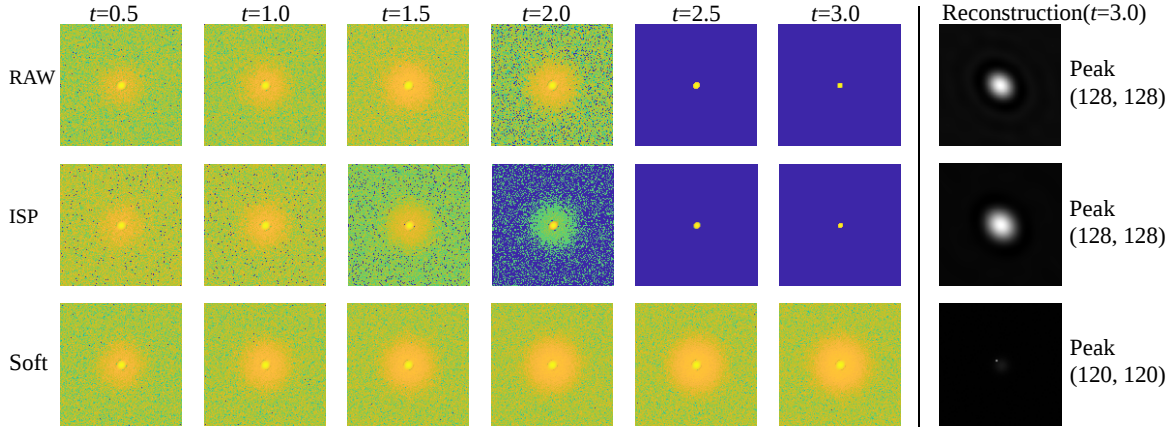


图 4 正常及饱和条件下构建的傅里叶频谱

Fig. 4 Fourier spectrum constructed under normal and saturated conditions

为了探究极低光子数下 RAW 探测可用区间及失效状态分析,在前述仿真基础上进一步降低曝光时间,模拟结果如图 5 所示。仿真的光传输系数中包含位于(120, 120)的单尖峰和中心位于(130, 130)的弥散斑。随着曝光时间降低,重建的光传输系数图像中信号逐渐被噪声淹没;在曝光时间低至 0.004 时,仿真的理想无噪探测值最大为 4,此时频谱中已经有了较为明显的频点缺失现象,而 RAW 探测仍能重建出较为稳定的直接反射点位置,但误检概率开始急剧上升;曝光时间进一步降低时进入到失效区间,光照峰位置探测结果被噪声主导,此时 ISP 探测已经出现偏移,说明 ISP 中非线性处理及位深压缩使其相较于 RAW 数据更容易失效。

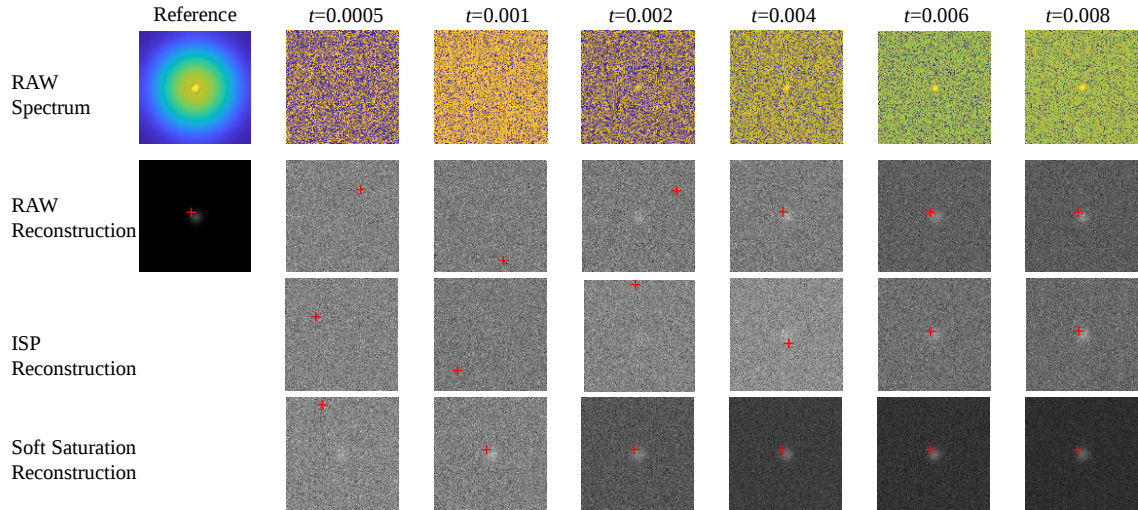


图 5 低光子数条件下傅里叶频谱及重建

Fig. 5 Fourier spectrum and reconstruction under low photon count condition

2.2 低光子数条件下的频谱修正仿真实验

为了验证所提方法在低光子数条件下的可行性与有效性,从而扩宽 HDR 的可用下限,对光传输重构过程进行仿真,以像素点(120, 120)为直接光照对应的最大峰所在位置,曝光时间取 $t = 0.004$ 。为了模拟不同的反射条件,设置分别具有单峰和多峰的两种光传输系数。图 6(f)为单峰光传输系数,代表仅存在直接

反射;图 7(f)为具有三个峰的光传输系数,代表直接反射与间接反射共存。

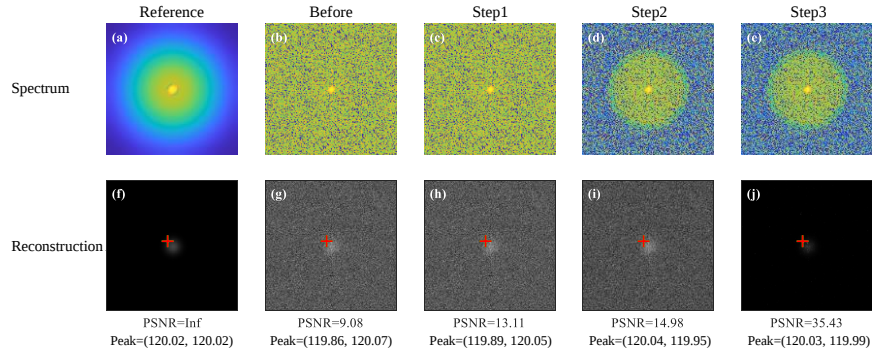


图 6 单峰光传输系数的频谱逐步修正与重建

Fig. 6 Stepwise correction and reconstruction of the spectrum of the single-peak light transport coefficient

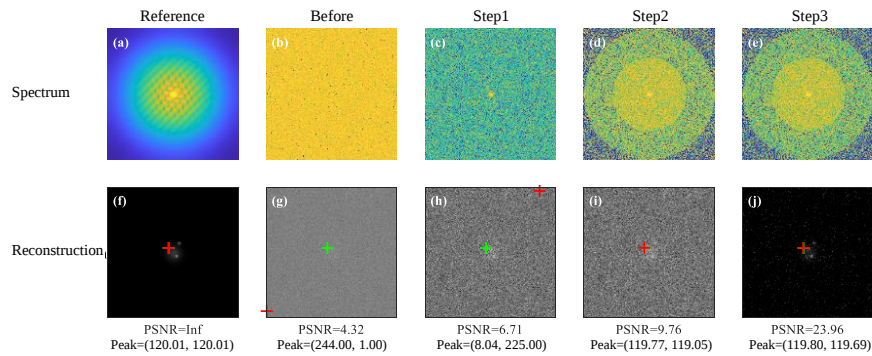


图 7 多峰光传输系数的频谱逐步修正与重建

Fig. 7 Stepwise correction and reconstruction of the spectrum of the multi-peak light transport coefficient

直接重建时,频谱及光传输系数背景噪声严重,光照峰扩散、旁瓣抬升,定位产生轻微偏移;当探测值中整体存在较大偏置的时候,角点位置处出现伪峰,如图 7(g)所示。表明在低光子数条件下,重建的限制表现为频域估计置信度下降导致的光照峰位置偏移与误检风险上升。

所提方法通过三步修正逐步改善上述问题。步骤 1 对异常观测值进行抑制并削弱全局偏置项,使极端伪峰显著降低,但仍可能出现主峰被噪声压过、峰与旁瓣对比不足而导致误检的情况,如图 7(h)所示;步骤 2 通过自适应收缩压低噪声底,使主峰从噪声背景中显现,峰值位置趋于稳定,探测到正确的直接光照点,其中,对不同光传输系数独立自适应计算其频谱收缩半径与收缩强度,如图 6(d)、图 7(d)所示。步骤 3 进一步恢复高频有效成分并抑制不稳定增益与噪声。对比图 6 与图 7 可以看出,多峰探测结果相较于单峰不稳定程度大幅提升,此时频谱修正的意义更为显著,只有当其噪声底得到有效抑制且频域结构不被异常点破坏时,间接反射对应的次峰才可能从背景中分离出来,同时准确定位到正确的直接反射对应的像素点,从而支持更复杂三维路径的识别与融合。

为进一步说明频谱修正效果,对频谱修正前后光传输系数重建质量进行评价,评价标准为重建的光传输响应图的 PSNR、SSIM、光照最大峰位置偏移量,如图 8 所示。图中五条折线分别为三种探测方式直接计算结果、ISP 探测经频谱修正处理后的计算结果与 RAW 探测经频谱修正处理后的计算结果,从而对比说明所提方法的效果提升与适用范围。本文与现有方法在前端均采用并行单像素测量思想,不同之处在于后续处理中,当前方法以 ISP 处理后的 RGB 图像为基础,结合不同频谱构建方式或定位算法完成重建,所提方法则通过频谱修正抑制动态范围受限条件下的定位偏移。基于这一关系,以 ISP 探测的并行单像素结果作为同类单像素方法对比基线,说明所提方法在定位稳定性上的提升。对于各项评价标准,直接计算时,软饱和和探测的重建质量始终高于 RAW 探测和 ISP 探测,说明低光子数条件下光传输系数的真实性和光照峰定位的准确性极受入射光子数影响。同等极低曝光时间下,多峰光传输系数的各项指标均劣于单峰光传输系

数,且更容易出现最大峰定位误检的情况。利用所提方法在RAW数据的基础上进行频谱修正后,单峰与多峰光传输系数相较于恢复前在各项评价标准上均出现明显提升,并且随着曝光时间的增加,精度进一步提高并逐渐趋于稳定,尤其对于位置偏移量这一核心需求,始终保持较小的误差水平,证明了本课题所提频谱修正方法的有效性。而对于ISP图像应用频谱修正方法的重建结果,虽然整体在PSNR与SSIM上带来一定改善,但其效果随干扰强度和峰结构变化而不稳定,因此在位置偏移量这一指标中存在起伏,说明该方法的稳定适用前提为RAW数据构建的频谱。

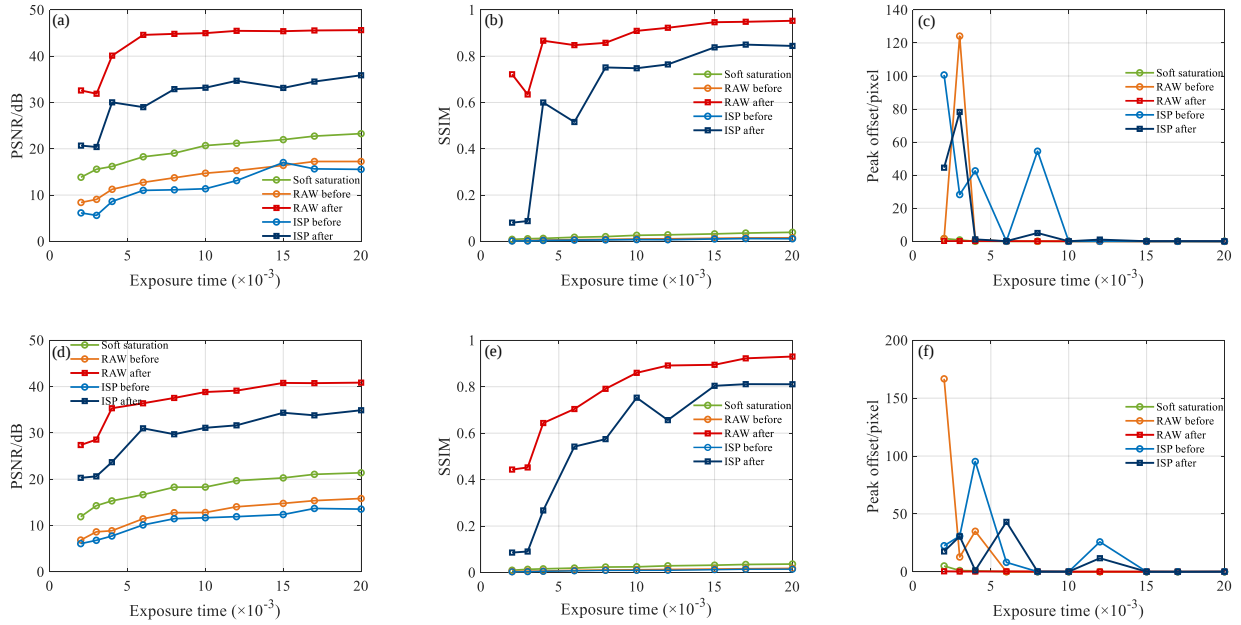


图8 频谱修正前后的PSNR、SSIM、最大峰偏移量。(a)-(c)单峰光传输系数;

Fig. 8 PSNR, SSIM, and maximum peak offset before and after spectrum correction. (a)-(c) Single-peak light transport coefficient; (d)-(f) Multi-peak light transport coefficient

图9为频谱相位角平均绝对误差随曝光时间的变化情况。随着曝光时间增加,相位误差整体均呈下降趋势,且ISP折线明显更高,说明低光子数条件下的相位受信噪比与非线性的极大影响。频谱修正后相位误差相较于修正前整体相近而略有下降,表明所提方法没有引入新的相位偏差,并且在一定程度上抑制了相位扰动,为直接峰定位与后续三维重建提供了更稳定的频谱基础。

2.3 实物测量实验

为了验证本文方法的有效性,以及所提方法相较于当前普遍的基于传统RGB图像的并行单像素方法在三维测量中的优势,利用多反射率物体等HDR挑战验证方法的有效性,对具有复杂反射率的金属台阶和彩

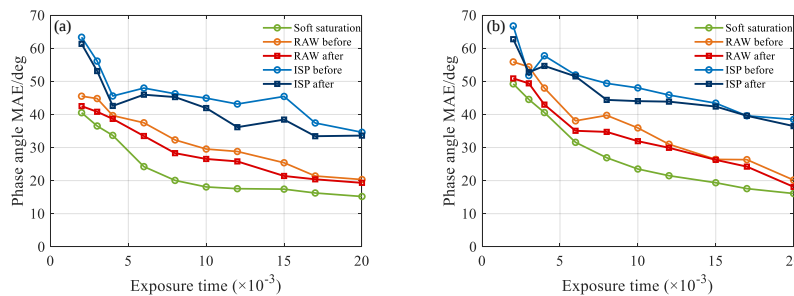


图9 频谱修正前后的频谱相位角平均绝对误差。(a)单峰光传输系数;(b)多峰光传输系数

Fig. 9 Average absolute error of spectrum phase angle before and after spectrum correction. (a) Single-peak light transport coefficient; (b) Multi-peak light transport coefficient

色石膏进行表面三维形貌测量。实验系统如图 10, 投影仪型号为 DLP4710EVM-LM, 分辨率为 $1\,280\text{ pixel} \times 800\text{ pixel}$, 相机型号为 MQ042CG-CM, 分辨率为 $2\,048\text{ pixel} \times 2\,048\text{ pixel}$ 。为了减少实验条件的干扰带来的误差, 仅进行一次投影拍摄, 分别保存为 TIF 格式的 RAW 图像和 JPEG 格式的 RGB 图像。

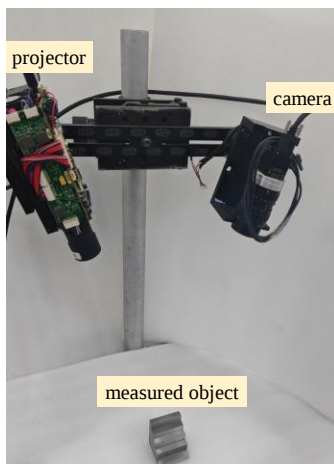


图 10 实验系统

Fig. 10 Experimental system

金属台阶如图 11(a)所示, 该台阶具有五个不同反射率台阶面。为验证所提方法的有效性, 将所提方法与传统 FPP 方法和多重曝光法进行了三维重建对比。其中, 两种方法均采用基于相移法的相位测量轮廓术, 投影并采集三频十二步相移变形条纹图像, 并利用多频外差法获得绝对相位。

图 11(b)和图 11(c)分别为传统 FPP 方法某幅采集条纹和相应的三维重建结果。曝光时间为 25 ms , 可以看出其中同时存在过曝区域和曝光不足区域。图 11(d)为多重曝光法(10次曝光)的三维重建结果, 对每个相移步采集多曝光序列, 通过饱和检测与权重融合得到 HDR 条纹图, 能够重建完整的 HDR 金属台阶面。图 11(e)和图 11(f)分别为 ISP 探测的并行傅里叶单像素方法和所提方法的三维重建结果, 为避免高反射率区域发生过曝, 曝光时间选择为 5 ms 。对比点云可以看出, ISP 探测方法相较于传统方法有更强的抗干扰能力, 但在低反射率区域仍存在几处明显的点云缺失, 而所提方法在缺失区域可以重建出完整的点云, 与多重曝光法的结果相差不大, 验证了所提方法的有效性。

为了定量对比所提方法的重建精度, 将重建后的台阶点云数据拟合成平面并计算相邻拟合台阶面的距离, 以三坐标测量机(精度为 $1\text{ }\mu\text{m}$)测得标准值作为真实值, 分别计算多重曝光法、ISP 直接重建、RAW 直接重建和所提方法的台阶面距离并进行精度分析。表 1 为测量结果与测量误差。所提方法相较于 ISP 探测直接重建的精度有了明显提高, 平均测量误差绝对值提升 54.3% , 相较于 RAW 直接重建的平均测量误差绝对值提升 16.2% , 接近于多重曝光的重建精度, 说明所提方法可以扩展 HDR 下限并稳定峰结构。

为说明所提方法在纹理重建方面的有效性, 对表面一侧为黄色、一侧为蓝色的石膏小熊进行探测, 如图 12(a)所示。其颜色差异导致的反射率不同会造成局部响应差异, 同时颜色交界处存在明显纹理与边界结构, 用于验证所提方法对边界连续性和纹理可辨性的影响。图 12(d)为传统 FPP 方法的三维重建, 可以观察到在低反射、高吸收的蓝色区域以及颜色交界附近, 点云覆盖范围明显收缩, 并伴随局部孔洞与边界断裂; 在鼻尖等局部曲率较大且条纹投影角度敏感的位置, 出现显著缺失与纹理塌陷。图 12(f)为所提方法的三维重建结果, 对比可见, 所提方法在整体上获得了更大的有效点云覆盖范围, 同时鼻子区域的缺失得到明显补充, 局部表面细节呈现更清晰、连贯的空间分布。

图 13 为颜色交界区域的点云分布, 受物体表面颜色差异导致的反射率不均衡影响, 传统方法与 ISP 探测的并行单像素方法均在交界处出现点云错层缺陷, 所提方法通过提升光照峰定位准确性与稳定性, 有效避免了颜色差异对后续解算的干扰, 显著改善此点云断裂错层现象。上述现象表明, 所提方法能够在存在反射率差异与强边界细节的复杂表面上, 提高有效像素保留与三维重建的稳定性, 增强边界区域的纹理解析力。此外, 传统点云纹理/色彩赋值通常直接依赖单张白光或环境光条件下的相机成像结果, 其色彩一致

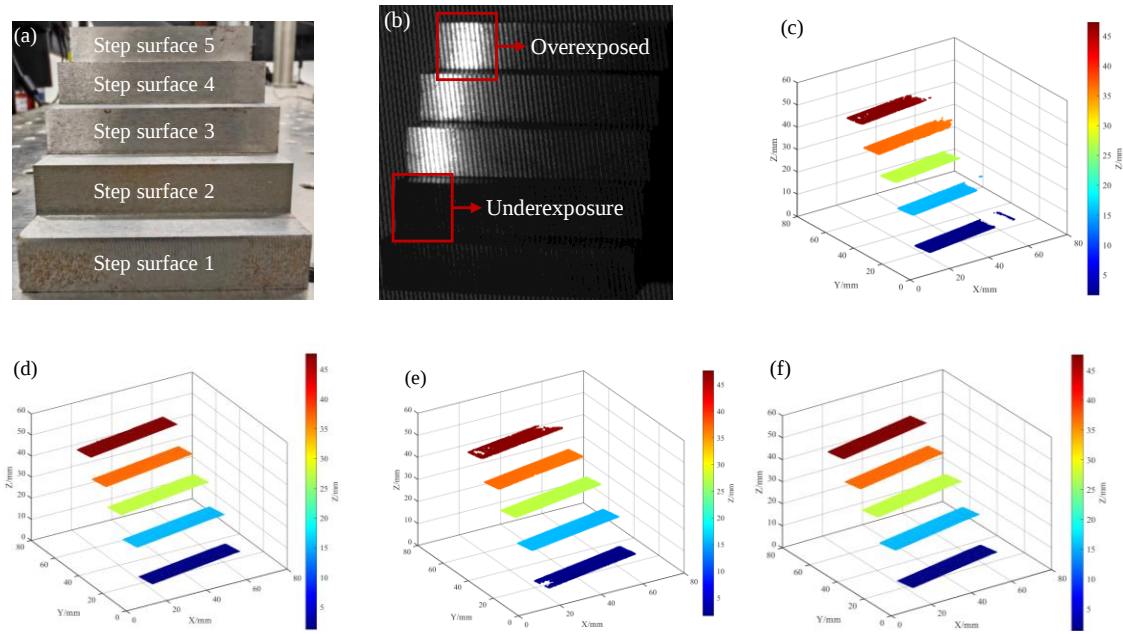


图 11 金属台阶实验结果对比。(a)台阶实物图;(b)传统方法采集条纹;(c)传统方法重建;(d)多重曝光法重建;(e)ISP探测的并行FPSI重建;(f)所提方法重建

Fig. 11 Comparison of experimental results of metal steps. (a) Physical image of the step; (b) Fringes collected by the traditional method; (c) Reconstruction by the traditional method; (d) Reconstruction by the multiple exposure method; (e) Parallel FPSI reconstruction detected by ISP; (f) Reconstruction by the proposed method

表 1 HDR 台阶的测量结果与误差

Table 1 Measurement results and errors of HDR steps

Step surface	Measurement results/mm				Absolute value of measurement error/mm			
	1—2	2—3	3—4	4—5	1—2	2—3	3—4	4—5
Standard value	9.771	9.019	10.984	13.006	\	\	\	\
	7	7	0	6				
Multiple exposure method	9.707	9.069	11.046	12.936	0.064 4	0.049 8	0.062 7	0.070 6
	3	5	7	0				
ISP detection	10.292	9.206	10.882	13.085	0.250 6	0.187 2	0.101 2	0.078 5
	3	9	8	1				
RAW detection	9.773	8.929	11.060	13.175	0.001 6	0.090 5	0.076 0	0.168 7
	3	2	0	3				
The proposed method	9.853	9.095	10.930	13.077	0.081 3	0.076 2	0.053 6	0.071 1
	0	9	4	7				

性与纹理可辨性易受到拍摄条件影响。相比之下,所提方法在RAW域获取探测数据,并利用Bayer阵列的原始采样结构在同一重建框架内实现几何与辐射信息的同步估计,使纹理赋值由光传输亮度与通道响应共同约束,从而提升HDR条件下的色彩稳定性与边界一致性。

上述金属台阶与石膏小熊的重建实验结果表明,在面向HDR表面物体的三维重建任务中,相较于基于传统数据处理模式ISP链路的重建结果,所提方法在高反光区域的点云覆盖与空洞抑制、以及台阶高度等几何量测的稳定性与精度方面均表现出更明显的提升;相较于传统后处理贴图式的纹理赋值方式,所提方法能够在RAW域与光传输重建的统一框架下获得更一致的几何-纹理对应关系与色彩效果,从而复杂反射场景下的高动态范围三维测量提供了更可靠的几何与纹理联合表达。

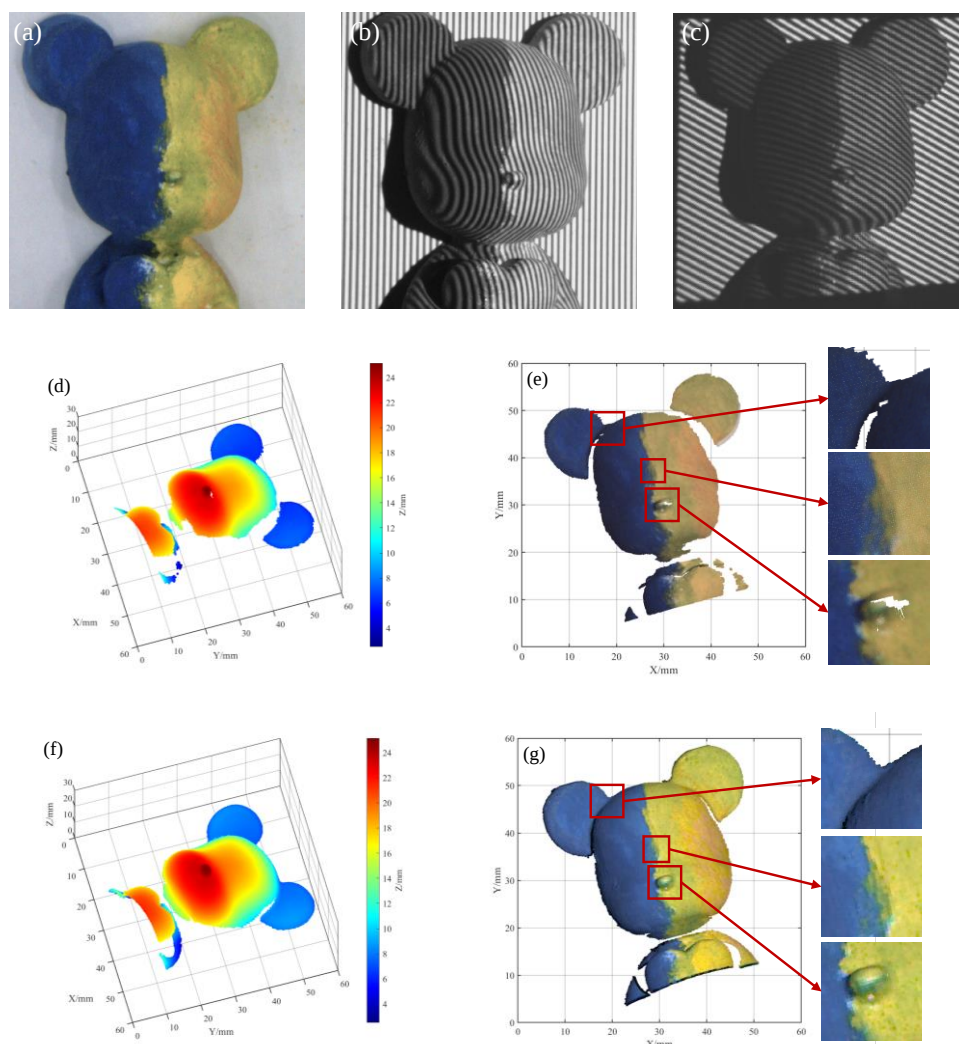


图12 黄蓝拼色石膏。(a)实物图;(b)传统方法采集条纹;(c)RAW探测采集条纹;(d)传统方法重建;
Fig. 12 Yellow-blue color blocked gypsum. (a) Physical image; (b) Stripes collected by traditional methods; (c) Stripes collected by RAW detection; (d) Reconstruction by traditional methods; (e) Details of reconstruction by traditional methods;
(e)传统方法重建细节;(f)所提方法重建;(g)所提方法重建细节
(f) Reconstruction by the proposed method; (g) Details of reconstruction by the proposed method

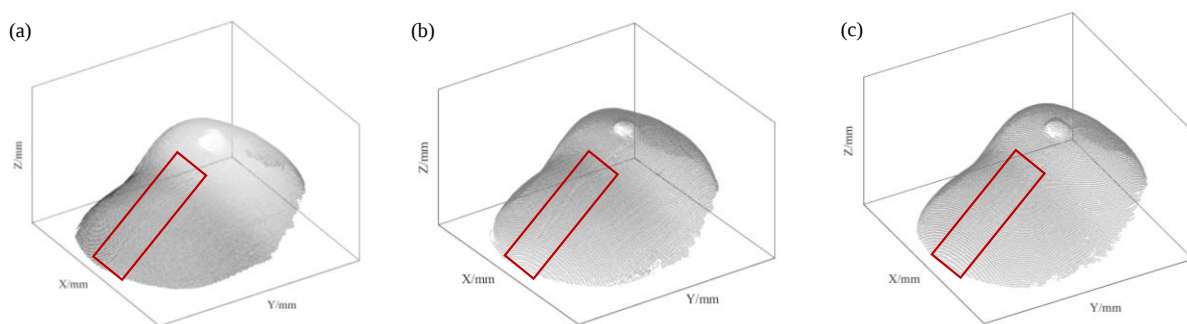


图13 颜色交界区域对比。(a)传统相位方法;(b)ISP探测的并行FPSI方法;(c)所提方法
Fig. 13 Comparison of color boundary regions. (a) Traditional phase method; (b) Parallel FPSI method detected by ISP;
(c) Proposed method

3 讨论

所提频谱修正方法虽然采用分步实现,但各步骤在数值上具有明确的稳定性基础。具体而言,步骤1中基于Huber损失的鲁棒数据一致性估计,本质上是在四步相移观测下进行频点参数的凸优化求解,目标函数值单调下降并收敛到稳定极小点,其恢复误差主要受四步相移残差差分及结构性偏置影响。步骤2对频谱施加保相位幅值收缩,收缩因子始终限制在 $[0, 1]$ 内,因此该步骤不会放大前一步误差,只会抑制噪声主导频点的幅值贡献。步骤2引入的幅值收缩偏差被限制在 $k_b \hat{\omega}_b$ 范围内,直接受频带收缩强度与噪声尺度控制。步骤3将系统频域衰减补偿写成带正则项约束的稳定反卷积问题,其闭式解唯一,且逆增益受正则项限制,从而避免了高频直接反演带来的数值失稳。误差主要表现为噪声传播项与正则偏差项之间的折中,大小由衰减强度 α 、归一化频率半径 $R(k)$ 及正则项 $\partial(k)$ 共同决定。整个三步框架分别对应单调收敛的鲁棒估计、有界收缩映射与增益受控的稳定逆问题,最终恢复误差在残差控制、收缩约束和稳定补偿共同作用下保持在可分析、可调节的范围内,保证了低光子条件下频谱修正过程的整体稳定性与可解释性。

从计算效率与工程实现角度看,该方法的主要额外时间成本集中于步骤1的逐频点鲁棒解调,而后两步骤均为逐频点闭式运算,最终重建阶段则主要由频谱补全与二维逆傅里叶变换构成。若有效采样频点数记为 N 、鲁棒估计平均迭代次数记为 T 、重建光传输图尺寸为 $P \times Q$,则整体复杂度可概括为 $O(NT + N \log N + PQ \log(PQ))$ 。因此,整体重建流程的主要耗时并不来自与频谱修正过程,而是来自大规模频点上的独立批量计算,从而具备较好的GPU加速与多核并行潜力。本文工作的重点在于验证RAW域频谱修正对低光子HDR三维重建的物理有效性,因此没有追求速度上的大幅提升,但从计算结构本身看并没有引入不可并行的限制,后续可通过频点级并行、批量矩阵运算等进一步提升工程实用性。

4 结论

本文围绕并行傅里叶单像素三维重建系统分析了探测链路非线性、饱和机制与噪声传播对频域测量可靠性及三维结果稳定性的影响,提出了面向真实探测链路的建模与RAW探测框架下的频谱正则化修正方法。通过频域鲁棒估计、幅相解耦自适应去噪与增益复原,抑制噪声并增强有效频域结构,提升光传输峰位定位稳定性。实验结果表明,所提频谱修正方法在低光子数与复杂反射条件下能够显著降低伪峰与背景噪声、改善高反光区域空洞与离群点,相较于相机传统ISP探测精度大幅提高,同时利用RAW Bayer响应与光传输峰幅值亮度下实现与几何同步的色彩获取,使纹理细节具有更好的连续性与可辨性。本文以离线验证为主,没有进行效率上的优化,但该流程天然具备像素级并行性,适合与GPU加速、分块缓存等解调融合。进一步地,本文方法与传统条纹投影、多曝光HDR策略等并不冲突,可作为频域修正与复杂反射抑制模块补足系统的有效动态范围下限,为面向文物保护、溯源与高价值目标的非接触测量提供更现实的技术组合路径。

参考文献

- [1] WU Jun, WANG Zirui, WU Xiao, et al. Three-dimensional measurement for ice formation on aircraft engine blades based on inverse reconstruction of refractive light paths[J]. *Measurement*, 2026, 257: 118940.
- [2] WANG Zhizhuo, LU Rongsheng. Highly reflective surface shape measurement technology based on multiple viewpoints and fringes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(9): 0912001
王志卓, 卢荣胜. 基于多视点和条纹的高反射表面面形测量技术[J]. *光子学报*, 2023, 52(9): 0912001.
- [3] WILLIAMS R, THOMPSON T, ORR C, et al. Developing a 3D strategy: pipelines and recommendations for 3D structured light scanning of archaeological artefacts[J]. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 2024, 33: e00338.
- [4] CHEN Xiang, WANG Ling, DING Feng. Optimization method of 3D reconstruction of metal cultural relics based on 3D laser scanning data reduction[J]. *The Journal of Engineering*, 2023, 2023(12): e12337.
- [5] LI Aiqun, MIAO Yiming, HOU Miaole, et al. Full-scale replication of large grotto relics based on high-precision 3D models[J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2022, 34(3): 125-132.
李爱群, 苗一鸣, 侯妙乐, 等. 基于高精度三维模型的大型石窟类文物等比例复制[J]. *文物保护与考古科学*, 2022, 34(3): 125-132.
- [6] ZHANG Zibang, MA Xiao, ZHONG Jingang. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6225.

- [7] DING Zilin, ZHANG Zibang, XIONG Siming, et al. Seeing through fire with one pixel[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 183: 108540.
- [8] ZHANG Zibang, LU Tianao, PENG Junzheng, et al. Fourier single-pixel imaging techniques and applications[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(6): 22-40.
张子邦, 陆天傲, 彭军政, 等. 傅里叶单像素成像技术与应用[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(6): 22-40.
- [9] JIANG Hongzhi, YANG Qingyan, LI Xudong, et al. 3D shape measurement in the presence of strong interreflections by using single-pixel imaging in a camera-projector system[J]. Optics Express, 2021, 29(3): 3609-3620.
- [10] NenqingLYU, YU Haotian, HAN Jing, et al. Structured light-based underwater 3-D reconstruction techniques: a comparative study[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 161: 107344.
- [11] Ni Yubo, Yu Zhiwei, Fu Shuai, et al. High dynamic range three-dimensional imaging via angular Fourier slicing enhanced burst photography[J]. Optics and Laser Technology, 2025, 192: 113955.
- [12] HAN Hexiang, GAO Nan, ZHANG Guofeng, et al. Three-dimensional morphology measurement of highly reflective objects based on three channel parallel processing[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(7): 0712003.
韩鹤翔, 高楠, 张国锋, 等. 基于三通道并行的高反光物体三维形貌测量[J]. 光子学报, 2024, 53(7): 0712003.
- [13] WANG Qijiang, LIU Yuankun, WEI Zhendong, et al. Adaptive fringe projection algorithm based on region mapping for high-reflectivity surfaces[J]. Laser Journal, 2024, 45(5): 34-40.
王启江, 刘元坤, 魏振东, 等. 面向高反物体的区域映射自适应条纹投影方法[J]. 激光杂志, 2024, 45(5): 34-40.
- [14] JIA Junying, YANG Shuang, YANG Haibo, et al. Research of low-reflection workpieces 3D reconstruction method based on structured light[J]. Laser Journal, 2025, 46(4): 88-96.
贾军营, 杨爽, 杨海波, 等. 基于结构光的低反射工件三维重建方法研究[J]. 激光杂志, 2025, 46(4): 88-96.
- [15] RITTLER T, SEITNER F, GELAUTZ M. Structured-light-based depth reconstruction using low-light pico projector[J]. Journal of Mobile Multimedia, 2016, 12(1-2): 125-137.
- [16] INGLE A, VELTEN A, GUPTA M. High flux passive imaging with single-photon sensors[C]. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019: 6753-6762.
- [17] FENG Y, LU Y, SBAIZ L, et al. Bits from photons: oversampled image acquisition using binary poisson statistics[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4): 1421-1436.
- [18] HASINOFF S, DURAND F, FREEMAN W. Noise-optimal capture for high dynamic range photography[C]. 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010: 553-560.

Research on High Dynamic Range 3D Reconstruction Based on Parallel Single-pixel Light Transport Spectrum Correction

YU Zhiwei¹, YIN Lei², NI Yubo¹, LIU Yaning¹, MENG Zhaozong¹, GAO Nan¹, ZHANG Zonghua¹

(1 School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

(2 China Electronics Technology Group Corporation Optoelectronics Research Institute, Tianjin 300308, China)

Abstract: To meet the specific demands of cultural heritage digitization, such as grotto murals and metallic handicrafts, optical three-dimensional reconstruction often faces high dynamic range challenges caused by the coexistence of complex surface texture and strong reflections. Under conventional sensing pipelines, these challenges lead to key issues including signal saturation, holes in low signal-to-noise ratio regions, and outliers in the reconstructed point cloud. Parallel Fourier single-pixel imaging is inherently suitable for complex texture and reflection conditions. However, in practical sensing chains it is still jointly constrained by the loss of physical information introduced by conventional image processing pipelines and by limited effective dynamic range. As a result, distortions in frequency domain measurements propagate and accumulate in the stages of light transport estimation and three-dimensional reconstruction, thereby limiting the completeness and stability of high dynamic range surface reconstruction. This work adopts parallel Fourier single-pixel-imaging-based three-dimensional reconstruction as the overall framework and treats the per-pixel light transport coefficient as the key intermediate quantity for geometric recovery. On this basis, a robust estimation and regularized correction method guided by frequency domain distribution characteristics is developed. First, a frequency domain observation model consistent with phase-shift

demodulation is established on raw measurements, explicitly modeling noise propagation in the form of frequency domain estimation errors. To justify the necessity of using raw data in terms of physical consistency and controllable error behavior, typical sensing pipelines are compared, showing that outputs after conventional image processing alter the amplitude ratio relationships across phase-shifted measurements, which is detrimental to subsequent spectrum estimation and peak localization. Raw data are therefore used instead of conventionally processed images. Second, the noise impact and spectrum degradation mechanisms under low-photon conditions are addressed, and a decomposed frequency domain optimization strategy is proposed. Magnitude and phase are decoupled in the frequency domain; robust estimation is applied to suppress noise-induced abnormal perturbations; phase preserving adaptive denoising is performed to lower the noise floor and emphasize reliable frequency components; and regularized restoration is finally applied to refine the spectrum and improve the reliability of effective frequency domain structures, thereby obtaining a more faithful light transport response. Finally, the corrected light transport estimates are used for camera-projector geometric recovery to generate point clouds via triangulation, and a geometry-texture consistent color mapping is further constructed by combining the Bayer channel responses in raw data with the reconstructed light transport response. Experimental results demonstrate that the proposed frequency domain robust estimation and regularized correction method significantly improves the stability and completeness of three-dimensional reconstruction in challenging environments where low photon conditions and strong reflections coexist. Compared with reconstructions based on conventional data processing pipelines, the method effectively suppresses frequency domain noise perturbations, reduces spurious peak elevation and sidelobe spreading in the light transport coefficients, and markedly enhances both the energy concentration and positional stability of the primary peak associated with direct illumination. For highly reflective targets such as a metallic step specimen, the method substantially alleviates holes and outliers in specular regions and improves overall geometric accuracy by 54.3% relative to the conventional processing mode. For textured targets with clear material or color boundaries such as a colored plaster bear, the method preserves greater sharpness and continuity of texture boundaries and is less sensitive to imaging conditions. Overall, by improving the reliability of effective frequency domain structures, the proposed method significantly reduces the accumulation of frequency domain measurement distortions induced by sensing chain nonlinearity and photon noise in the final three-dimensional results, achieving unified improvements in point-cloud completeness and accuracy. The proposed raw based frequency domain robust estimation and regularized correction approach can serve as a physically grounded complement to existing high dynamic range strategies. It substantially enhances the reliability of light transport peaks, point-cloud completeness, and texture expression consistency in three-dimensional measurement of complex reflective objects, providing a practical technical pathway that balances low-level physical consistency with high dynamic range capability for noncontact precision measurement of high value targets such as cultural heritage preservation and provenance tracing.

Key words: Parallel Fourier single-pixel imaging; High dynamic range; Spectrum regularization correction; Light transport coefficient; Three-dimensional reconstruction

OCIS Codes: 100.6890; 110.1758; 110.6880; 040.3780

CSTR: 32255.14.gzxb20265508.0812003