

光电成像系统图像质量优化方法研究

田春雨

中国电子科技集团公司第五十三研究所 天津 300308

摘要: 光电成像系统作为信息感知的“眼睛”，其输出图像的质量是决定下游应用成败的关键。然而，成像过程受到来自光学、探测器及环境等多方面因素的制约，导致图像质量劣化。本文旨在构建一个从“问题”到“解决方案”的完整逻辑框架。首先，系统性地剖析了影响图像质量的核心因素，包括光学系统的衍射极限与各类像差、探测器固有的噪声与动态范围限制，以及环境光照条件的影响；其次，针对上述每一类影响因素，深入探讨了当前主流的优化方法。在光学层面，论述了非球面/自由曲面设计、特殊材料与镀膜技术；在探测器层面，分析了提升量子效率、抑制噪声及扩展动态范围的技术路径；在数字处理层面，重点阐述了图像增强、复原（含超分辨率重建）及高动态范围（HDR）成像等算法。研究表明，未来的图像质量优化将走向光学、探测器与智能算法深度融合的协同范式，以实现性能的全面跃升。

关键词: 光电成像系统；图像质量；影响因素；像差；噪声；图像增强

引言

光电成像技术通过“光-机-电-算”的复杂链路，将物理世界的光辐射信息转化为可供分析的数字图像。这一过程的理想状态是无损、精确地记录场景的所有细节。然而，在现实世界中，成像链路的每一个环节都存在物理或工程上的局限性，这些局限性共同作用，使得最终输出的图像不可避免地偏离理想状态，表现为模糊、噪声、失真、动态范围不足等问题。因此，要有效提升图像质量，首要任务是清晰地识别并理解所有潜在的影响因素，并在此基础上，采取针对性的、系统性的优化策略。本文的研究思路遵循“诊断-治疗”的逻辑：首先，对影响光电成像系统图像质量的各类因素进行归因分析，将其划分为光学前端、探测器核心和外部环境三大类；然后，针对每一类影响因素，详细阐述从硬件设计到软件算法的多层次优化方法。这种结构化的论述方式，有助于建立对图像质量优化问题的系统性认知，并为相关领域的研究与实践提供清晰的技术路线图。

1 影响光电成像系统图像质量的关键因素

1.1 光学系统引入的退化因素

光学系统是成像的第一道关口，其物理特性决定了成像质量的理论上限。首先，受波动光学制约，任何光学系统都存在衍射极限，理想透镜也无法将点光源汇聚为理想像点，只能形成艾里斑，这是空间分辨率不可逾越的物理壁垒。其次，实际透镜存在多种几何像差：球差导致轴上点模糊，彗差引致轴外点拖尾，像散、场曲和畸变则分别造成像面弯曲、离焦及几何形变，严重损害图像清晰度与保真度^[1]。再者，光学玻璃材料对不

同波长光的折射率不同，产生色差，表现为彩色镶边，破坏色彩准确性与图像锐度。此外，系统内部多次反射和散射会产生杂散光，非成像光线均匀叠加于画面，降低整体对比度，并可能形成光晕或鬼影，进一步恶化视觉质量。这些因素共同构成了光学系统引入的主要退化机制。

1.2 探测器引入的退化因素

在光电转换过程中，信号不可避免地会与多种类型的噪声混合在一起。其中，光子散粒噪声源于光子到达传感器表面的量子随机性，是一种无法通过技术手段消除的根本性噪声；暗电流噪声则是由传感器内部热激发产生的电子所引起，其强度随工作温度的升高而呈指数级增长；读出噪声发生在信号从像素单元读出并进行放大和数字化的过程中，是电子电路固有的干扰。这些噪声的综合作用直接决定了图像的信噪比，尤其在低照度条件下，微弱的有效信号很容易被噪声所淹没。与此同时，图像传感器的动态范围也存在显著限制。动态范围定义为系统能够同时记录的最大不失真信号（由像素的满井容量决定）与最小可探测信号（由系统噪声基底决定）之间的比值。在面对高反差场景时，有限的动态范围常常导致亮部区域因电荷溢出而过曝，丢失所有细节，而暗部区域则因信号强度接近或低于噪声水平而陷入一片混沌^[2]。此外，传感器的空间采样能力也构成了另一个瓶颈。根据奈奎斯特采样定理，传感器的像素间距决定了其能够分辨的最高空间频率。当场景中存在的细节频率超过这一极限时，就会发生混叠现象，产生虚假的莫尔条纹等伪影，扭曲了真实的图像信息。

1.3 环境与系统因素

光照条件是最直接的外部变量,光照不足会放大传感器噪声的影响,使图像显得粗糙且细节不清;而光照过强则容易使传感器饱和,造成高光溢出。不均匀的光照分布,例如强烈的逆光或局部阴影,则会在同一幅图像中同时出现过曝和欠曝区域,给后续处理带来巨大挑战。对于远距离成像应用,如天文观测或地面遥感,大气并非一个理想的均匀介质,其内部的湍流会导致传播光波的波前发生随机畸变,使得远处的目标图像呈现出持续的抖动、模糊和闪烁,这种效应严重制约了地面望远镜的分辨能力。最后,成像平台自身的稳定性也是一个不可忽视的因素。无论是手持拍摄时的人为抖动,还是安装在无人机、车辆等移动载体上的振动,都会在曝光时间内导致成像目标与传感器之间发生相对位移,而在最终图像上形成运动模糊,使原本清晰的边缘变得弥散不清。

2 针对性图像质量优化方法

2.1 针对光学退化因素的优化方法

2.1.1 先进光学设计与精密制造

非球面透镜技术通过打破传统球面的旋转对称性约束,赋予光学设计师额外的自由度,使其能够在一个单一的光学表面上同时校正球差和彗差等多种像差,从而在减少透镜数量的同时提升成像质量。更进一步,自由曲面技术则完全摆脱了旋转对称性的限制,其表面形状可以是任意复杂的三维曲面,这为校正大视场、广角镜头中的复杂像差组合提供了前所未有的可能性,成为实现高性能、小型化成像系统的关键^[3]。在应对色差方面,消色差和复消色差设计是经典而有效的解决方案,它通过精心选择和组合具有不同阿贝数(即色散特性)的光学玻璃,例如将低色散的冕牌玻璃与高色散的火石玻璃胶合在一起,使得两种或三种特定波长的光线能够精确地汇聚于同一点,从而大幅削弱色彩镶边现象。所有这些精妙的设计构想,最终都需要依赖超精密加工技术和严格的装配公差控制才能得以实现,确保理论上的光学性能能够在物理实体中完美复现。

2.1.2 光学薄膜与计算成像

在每一个空气与玻璃的交界面上,都会有约4%的入射光因菲涅尔反射而损失掉。对于一个包含多片透镜的复杂系统而言,这种累积的光能损失是巨大的,并且这些被反射的光线会在镜筒内反复弹射,形成杂散光和鬼影。宽带增透膜(AR Coating)通过在表面沉积多层具有特定厚度和折射率的介质薄膜,利用光的干涉相消原理,可以将单个表面的反射率降低到0.1%甚至更低,

从而显著提高整个光学系统的透过率,有效抑制杂散光,提升图像的对比度和色彩饱和度。近年来,一种名为计算光学成像的新兴范式正在颠覆传统的设计思路。该方法不再一味追求光学端输出完美的中间像,而是主动地、有目的地在光学传递函数中引入一种已知的、可控的编码调制,例如使用特殊的相位掩模来扩展景深或抑制混叠。随后,借助强大的数字信号处理器,运行专门为此光学编码设计的解卷积或反演算法,对采集到的“编码”图像进行“解码”,从而恢复出高质量的最终图像。这种光算协同的设计理念,巧妙地将部分复杂的光学负担转移到了灵活且成本日益降低的数字域,为突破传统成像系统的物理限制开辟了新的道路。

2.2 针对探测器退化因素的优化方法

2.2.1 信噪比提升技术

背照式(BSI)CMOS技术是一项革命性的进步,它通过将感光二极管置于金属互连线路层之上,彻底避免了入射光线被上层金属线路遮挡的问题,从而将量子效率,尤其是在对蓝光和近紫外光敏感的区域,提升到了前所未有的高度,显著增强了有效信号的强度。在噪声抑制方面,相关双采样(CDS)技术被广泛应用于读出电路中,它通过先后两次采样像素的复位电平和信号电平,并将二者相减,有效地消除了复位开关引入的kTC噪声以及部分低频1/f噪声。此外,通过采用深耗尽阱等先进的半导体制造工艺,可以增加光敏区的体积,从而在物理上抑制暗电流的产生;而对于读出噪声,则需要通过优化放大器的电路设计,选用低噪声器件,并尽可能缩短信号路径来加以控制^[4]。在某些对帧率和灵敏度要求高于空间分辨率的应用场景中,像素合并(Binning)技术提供了一种有效的折衷方案,它通过在模拟域或数字域将相邻像素的电荷或信号值进行累加,等效于创造了一个面积更大、感光能力更强的“超级像素”,从而在牺牲分辨率的同时,成倍地提升了信噪比和系统帧率。

2.2.2 动态范围扩展策略

最直接的方法是增大单个像素的满井容量,即增加其能够容纳的最大电荷数量。这通常通过优化像素的微透镜结构以提高聚光效率,以及设计更大体积的光电二极管来实现。另一种更为智能的策略是在像素级别集成多增益或非线性响应机制。这类传感器能够在单次曝光过程中,根据入射光强度的不同,自动切换像素的灵敏度模式:在暗区使用高增益模式以放大微弱信号,在亮区则切换到低增益模式以防止电荷饱和。如此一来,便能在同一幅图像内同时捕捉到宽广亮度范围内的细节信息。片上高动态范围(On-Chip HDR)技术,例如行交织

HDR,正是这一思想的具体体现。它通过在同一帧图像的奇偶行上施加不同的曝光时间,使得传感器在一次快门动作中就能获取长短曝光的信息,再通过片上或后端的融合算法生成一张高动态范围的图像,这种方法从根本上解决了传统多帧HDR在拍摄动态场景时容易产生鬼影的致命缺陷。

2.3 针对环境与系统因素的数字图像处理优化方法

2.3.1 图像增强与复原基础

图像增强技术主要着眼于改善图像的视觉效果,使其更符合人眼的感知习惯。全局性的对比度调整方法,如伽马校正,通过对像素值进行非线性映射,可以有效地压缩或拉伸图像的灰度范围,以适应不同的显示需求。直方图均衡化及其自适应变体(CLAHE)则通过重新分配图像的灰度级,使像素值的分布更加均匀,从而显著提升图像的整体或局部对比度,让隐藏在平淡背景中的细节得以显现。Retinex理论提供了一个更为生理学的视角,它认为人眼感知到的颜色和亮度是物体反射属性与环境光照共同作用的结果。基于此,Retinex算法试图将输入图像分解为照度分量(代表光照)和反射分量(代表物体本身),通过对这两个分量进行独立的、符合人类视觉特性的处理,再重新合成,能够非常有效地校正不均匀光照,并增强图像的细节和色彩恒常性。

2.3.2 超分辨率重建

超分辨率重建(Super-Resolution, SR)旨在突破传感器物理分辨率的限制。早期的SR方法主要依赖于多帧输入,利用相机抖动或微扫描带来的亚像素位移信息,通过复杂的配准和重建算法来合成一幅更高分辨率的图像。然而,近年来,基于深度学习的SR方法取得了突破性进展。这些模型,如SRCNN、EDSR乃至基于生成对抗网络(GAN)的Real-ESRGAN,通过在海量图像数据集上进行训练,学习到了低分辨率图像块与高分辨率图像块之间极其复杂的非线性映射关系。它们不仅能插值得到平滑的过渡,更能“幻化”出逼真的高频纹理和细

节,使得从单帧低质图像中恢复出高质图像成为可能。

2.3.3 高动态范围(HDR)成像

经典的多曝光HDR方法通过拍摄一组不同曝光时间的LDR(低动态范围)图像,利用算法估计出相机的响应函数,并将这些图像在辐射度域进行对齐和融合,生成一张包含了从最暗到最亮所有细节的HDR图像。最后,通过色调映射(Tone Mapping)算法,将这张拥有极高动态范围的图像压缩到标准显示器能够呈现的LDR范围内,同时巧妙地保留视觉上最重要的对比度和细节层次。随着片上HDR传感器的普及,单曝光HDR技术也日益成熟,它结合了硬件捕获的多曝光信息与高效的融合算法,为动态场景的HDR成像提供了可靠保障。

3 结语

本文首先系统梳理了制约光电成像系统图像质量的三大类核心因素——光学像差与衍射、探测器噪声与动态范围限制、以及环境干扰,并在此基础上,针对性地阐述了贯穿“光-机-电-算”全链条的优化方法体系。研究表明,图像质量的提升并非单一技术的胜利,而是系统工程成果。未来的发展方向必然是打破各环节壁垒的深度协同优化,特别是计算成像与人工智能的深度融合,将使得我们在物理定律的边界内,不断逼近乃至重新定义“完美成像”的可能性。

参考文献

- [1]王一飞,陈力锋,林忠劲,等.基于光电子集成技术的光学相干层析成像系统(特邀)[J].激光与光电子学进展,2024,61(19):216-231.
- [2]高伟萍,王飞鹏,贺养慧,等.平衡四正交探测器对分段式平面集成光电成像质量退化机理研究[J].激光杂志,2025,46(9):215-222.
- [3]梁文娜,李翰山.光电成像系统目标探测能力建模与性能评估[J].探测与控制学报,2025,47(4):174-181.
- [4]王潇潇,曾行昌,王志杰,等.光电成像系统中探测器的精密装调与测试[J].应用光学,2025,46(1):163-169.