



河北大学
HEBEI UNIVERSITY

密 级:

分 类 号:

学校代码: 10075

学 号: 20208015058

硕士学位论文

单像素成像系统的设计与实现

学位申请人: 韩佳成

指 导 教 师: 张素恒 副教授 杨丽君 教授

学 位 类 别: 理学硕士

学 科 专 业: 光学

院 系 名 称: 物理科学与技术学院

答 辩 日 期: 二〇二三年五月

Classified Index:
U.D.C.:

CODE: 10075
No. 2020

Dissertation for the Degree of Master

Design and Implementation of Single Pixel Imaging System

Candidate: Han Jiacheng

Supervisor: Prof. Zhang Suheng, Prof. Yang Lijun

Category of Academic Degree : Master of Science

Specialty: Optics

College: College of Physics Science & Technology

Date of Oral Defense: May, 2023

摘要

单像素成像是一种新颖的计算成像技术，借助于结构光场调制，仅使用单像素探测器即可获取物体的空间分布图像。得益于单像素探测器优异的性能，单像素成像有望解决光学成像的诸多难题。近年来，人们在非可见成像、极弱光成像和复振幅成像等领域陆续提出了多种单像素成像系统，这些系统大大拓展了成像的光谱范围，提高了成像的灵敏度，丰富了复振幅成像的模式。然而，目前的单像素成像系统在成像速度、调制效率以及结构成本等方面尚有不足。为了弥补现有系统的不足，本文设计并实现了三种不同类型的单像素成像系统。

(1) 设计实现了一种利用时间相关单光子计数器搭建的单像素成像系统。此系统在极弱光下充分利用了时间相关单光子计数器件的强大时间分辨能力，与时分复用原理相结合，并采用 DMD 对目标物体进行结构光调制，获得目标物体的全彩图像。不同于传统彩色成像，本系统采取单轮测量，将成像时间缩短为三分之一，实现极弱光环境下高效全彩成像。

(2) 设计并实现了一种基于纯相位调制的复振幅单像素成像系统，系统采用了 Hadamard 基扫描技术实现高质量成像。在此系统方案中，采用纯相位 LCoS-SLM 对准直激光束进行复振幅调制，同时采用无调制的激光束作为参考光束，之后经过 $4f$ 系统到目标物体上形成相干结构照明成像，避免了二次相位因素。同时用到了四步相移技术，通过针孔过滤使得单像素光电探测器检测目标光的零频分量，获得目标光的幅值频谱，最后利用 Hadamard 逆变换进一步提取所需的复振幅图像，系统具有高效率、高成像质量、高空间分辨率和简单稳定的实验配置。

(3) 设计实现了基于树莓派的单像素成像系统及基于树莓派的彩色单像素成像系统。该系统都以树莓派为核心，并且都采用了投影仪对目标物体投影 Hadamard 基底图案，探测器选用了性价比极高的光强传感器，基于树莓派的彩色单像素成像系统通过红绿蓝滤光片可以对目标物体进行彩色图像重构，整个系统结构紧凑，装置简单，成本低廉，适用于单像素成像的演示教学。

关键词 单像素成像 时间相关单光子计数 相位调制 树莓派

Abstract

Single pixel imaging is a novel computational imaging technique. With the help of structured light field modulation, a single pixel detector can be used to obtain spatial distribution images of objects. Due to the excellent performance of single pixel detector, single pixel imaging is expected to solve many problems in optical imaging. In recent years, a variety of single pixel imaging systems have been proposed in the fields of invisible imaging, extremely weak light imaging and complex amplitude imaging. These systems greatly expand the spectral range of imaging, improve the sensitivity of imaging, and enrich the mode of complex vibration imaging. However, the current single pixel imaging system has shortcomings in imaging speed, modulation efficiency, and structural cost. In order to make up for the shortcomings of the existing system, this paper designs and implements three different types of single pixel imaging system.

(1) A single pixel imaging system based on time dependent single photon counter is designed and implemented. This system makes full use of the powerful time resolution of time dependent single photon counting devices under extremely weak light, combines with the principle of time division multiplexing, and uses DMD to modulate the structured light of the target object to obtain the full-color image of the target object. Different from the traditional color imaging, the system adopts a single round measurement, the imaging time is reduced to one third, and the highly efficient full-color imaging is realized in the extremely weak light environment.

(2) A complex amplitude single pixel imaging system based on pure phase modulation is designed and implemented. The system adopts Hadamard based scanning technology to achieve high quality imaging. In this system scheme, pure phase LCoS-SLM is used to carry out complex amplitude modulation of the direct laser beam, and the unmodulated laser beam is used as the reference beam. After that, the coherent structure illumination imaging is formed on the target object through the 4f system, avoiding the quadratic phase factor. At the same time, the four-step phase shift technology is used to make the single pixel photodetector

Abstract

detect the zero-frequency component of the target light through pinhole filtering, and obtain the amplitude spectrum of the target light. Finally, the Hadamard inverse transform is used to further extract the complex amplitude image required. The system has high efficiency, high imaging quality, high spatial resolution and simple and stable experimental configuration.

(3) Design and implement a single pixel imaging system based on Raspberry PI and a color single pixel imaging system based on Raspberry PI. Both systems are based on raspberry PI, and both use projectors to project Hadamard base pattern on target objects. The detectors use highly cost-effective light intensity sensors. The color single-pixel imaging system based on Raspberry PI can reconstruct color images of target objects through red, green and blue filters, and the whole system has simple structure, compact device and low cost. It is easy to popularize and suitable for the demonstration teaching of single pixel imaging.

Keywords Single-pixel imaging Time-correlated single photon counting Phase modulation Raspberry PI

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 单像素成像研究背景及意义	1
1.2 单像素成像研究现状.....	2
1.3 本论文主要研究内容与章节安排	7
第二章 系统实现所用技术原理	9
2.1 Hadamard 变换原理	9
2.2 结构照明差分 Hadamard 单像素成像方法.....	10
2.3 零频探测与四步相移.....	11
2.4 本章小结.....	12
第三章 基于 TCSPC 的彩色单像素成像系统	13
3.1 系统装置选取.....	13
3.2 系统实现.....	18
3.2.1 时分复用技术.....	18
3.2.2 系统光路实现.....	19
3.2.3 信号处理模块实现.....	21
3.2.4 系统软件设计.....	24
3.3 系统测试.....	25
3.4 本章小结.....	26
第四章 相干结构照明的复振幅单像素成像系统	27
4.1 系统装置选取.....	27
4.1.1 硅基液晶空间光调制器.....	27
4.1.2 硅基液晶空间光调制器相位闪烁及伽玛校正	28
4.1.3 硅基液晶空间光调制器调制衍射效率及响应时间	29
4.1.4 激光源、探测器、采集卡选取.....	31
4.1.5 玻璃刻蚀物体定制.....	31
4.2 系统实现.....	33
4.2.1 系统光路实现.....	33
4.2.2 系统软件部分实现.....	35
4.3 系统测试.....	36
4.4 本章小结.....	37
第五章 基于树莓派的单像素成像系统	38
5.1 基于树莓派的单像素成像系统装置选取	38
5.1.1 系统硬件选取	38
5.1.2 滤波电路设计	40

5.1.3 系统模块集成及软件设计	42
5.2 基于树莓派的单像素成像系统实现	43
5.3 基于树莓派的单像素成像系统测试	45
5.4 基于树莓派的彩色单像素成像系统	46
5.4.1 三通道彩色探测模块.....	46
5.4.2 探测模块电路设计	48
5.4.3 系统模块集成.....	50
5.5 基于树莓派彩色单像素成像系统实现	51
5.6 基于树莓派的彩色单像素成像系统测试分析	52
5.7 本章小结	53
第六章 总结与展望	54
参考文献.....	55

第一章 绪论

1.1 单像素成像研究背景及意义

近几个世纪，随着生产力发展，图像渐渐成为人们日常生活的一个重要组成部分，同时成为人们获取信息最重要的技术手段之一。图像通常是使用数字传感器收集场景的空间信息，由亮斑和暗斑形成的图案。而近几年仅用一个像素成像成为可能，即单像素成像，此类成像方法主要通过探测器探测光强值，并对探测数据进行计算处理得出目标图像。其在极弱光成像^[1-3]和穿透介质成像^[4-5]等研究中有较阵列探测器更好的探测优势，同时也为一些苛刻的科研实验提供了新方向，近年来逐步成为科研工作者研究的重点。

极弱光成像是指在光强非常弱的情况下对目标探测，结合相关算法处理后得到清晰的图像。弱光条件下光信号一般呈现粒子特性，人们通常采用光子计数手段来实现成像，随着单像素成像更进一步的研究，极弱光成像得到了迅速发展，有效扩大了人类的可探索场景，在天文^[6-7]、生物医学^[8-9]、军事遥感^[10-11]等各个方向有着重要的应用。

除此之外，单像素成像在成像方法上对光的方向并不敏感，仅是对单位时间的光照强度的积分，因此，单像素成像可以很好地处理光在传播过程中由于光路和器件影响而带来的散射和畸变问题，并完成一些传统感光器件较难直接完成的成像，如光子计数成像^[12]、拐角成像^[13-14]、相位成像^[15-16]等。如将单像素成像技术应用于卫星遥感^[17]领域，相位成像在显微成像领域尤其是生物显微^[18]方面有着不可替代的作用。同时随着空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)^[19]的进一步更新迭代和应用，单像素成像中的照明编码环节有了更多的支持，进一步促进了单像素成像的发展。

单像素成像技术有诸多优势，不同装置的单像素成像系统可应用于不同场景，本论文中基于时间相关单光子计数(Time-Correlated Single Photon Counting, TCSPC)的单像素成像系统实现了在极弱光条件下以极高探测效率获得目标物体的彩色图像；基于相位调制的复振幅的单像素成像系统的实现是通过相位型空间光调制器实现了对相位物体成像；基于树莓派的灰度及彩色单像素成像系统，实验装置简洁明了，尤其是树

莓派彩色单像素成像系统装置能够在低成本的优势下重构出高质量的彩色图像，扩大了单像素成像技术应用场景。

1.2 单像素成像研究现状

单像素成像技术源于鬼成像，最早关于鬼成像技术的报道见于 1995 年 Pittman 等人利用量子纠缠效应的成像实验^[20]，称为双光子纠缠鬼成像(或者“关联成像”)。实验利用参量下转换(Spontaneous Parametric Down-Conversion, SPDC)光源产生的光子对流，经分束器被分成信号光和参考光，目标物体放置在信号光的光路中并与光子相互作用，参考光路上不放物体。将信号光路上的单像素探测器和参考光路上的面阵探测器获取的信号进行相关运算后，恢复出物体的空间强度信息，最后通过量子力学纠缠源成功地实现了光学成像，如图 1-1。由于实验过程中使用的是纠缠态的光源，所以当时鬼成像被认为是一种量子现象。

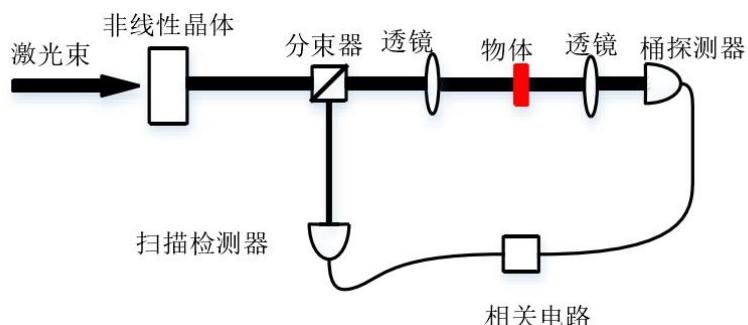


图 1-1 双光子纠缠鬼成像(出自文献[20])

2002 年，罗切斯特大学的 Boyd 课题组利用随机转镜和斩波器调制 He-Ne 激光实现了经典光源的关联成像^[21]图 1-2 所示，这里利用一个随机转动的反射镜将激光反射到分束器上，得到两路方向关联的光。在其中一个光路上放置成像物体，并用桶探测器收集光强。另一路光则不作任何调节，仅使用一个 CCD 来记录光线照明的位置。最后通过计算两个光路的强度关联，得到了物体的图像。2006 年 Rice 大学的学者们基于压缩感知理论提出了“单像素相机”的概念^[22]，利用数字微镜(Digital Micromirror Devices, DMD)实现快速光调制，并成功在 40% 的调制效率下实现了清晰成像。

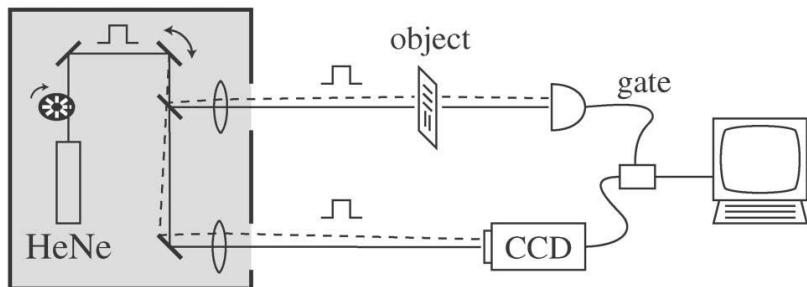


图 1-2 “双光子”重合成像实验装置(出自文献[21])

2008 年，Shapiro 等人发表的“计算鬼成像”^[23] 图 1-3 所示，这种系统尝试使用单个像素的探测器实现鬼成像，在该理论方案中，取消了进行空间分辨探测一路的探测器，取而代之的是使用一个可以进行光场空间分布调控的空间光调制器，他们利用自由空间光场传播的原理计算照明到物体表面光场的强度分布，最后利用单点探测器记录透过物体后光场的总强度值，最后通过关联算法就可以恢复目标物体的图像信息。同年 Massachusetts Amherst 大学的 Duarte 等人正式提出单像素成像(Single Pixel Imaging, SPI)的概念^[24]，使用压缩感知算法搭建了光路，在他们的单像素成像光路中包含有光源、空间光调制器和单像素探测器等器件。2009 年，以色列魏茨曼科学研究所的 Katz 等人利用二维相位型液晶空间光调制器实现了单臂的计算关联成像^[25]。此成像方案在 Shapiro 提出计算鬼成像的思想基础上，将整个装置从双光路简化为了单光路。他们使用空间光调制器代替原来的旋转毛玻璃产生赝热光源，然后根据标量衍射理论计算出阵列探测器接收到的空间光调制器反射的光强分布，这样便省去了参考光路的阵列探测器。在该方案中，使用一个不具备空间分辨能力的单光子探测器与鬼成像算法进行结合就可以获取物像。

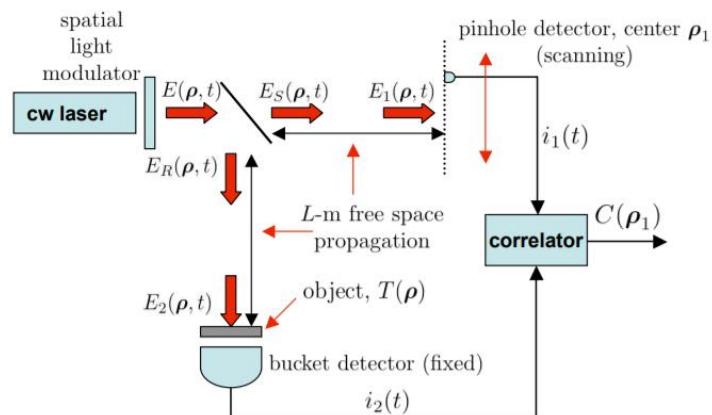


图 1-3 SLM 鬼成像实验装置(出自文献[23])

极弱光条件下，光子数的散粒噪声非常大，如何在信噪比极低的条件下获取高质量的图像一直是弱光成像领域中亟待解决的难题。在 2014 年，由 Ahmed Kirman 等人通过建立单光子探测过程的概率统计模型，结合目标相邻像素的空间相关性，并采用单点扫描成像机制提出了一种第一光子成像的方案^[26]，即通过在每个像素处使用第一个探测光子来重建图像，并首次在弱光条件下利用时间相关单光子计数模块的精确计时特性实现了第一光子像。2016 年，Sun 等^[27]对高速光子计数计算鬼成像进行了研究，实现了一个单像素三维成像系统，脉冲激光均匀地照亮 DMD 向目标物体提供结构化照明，后散射光被收集到光电二极管上。将测量到的光强用于三维重建算法，以重建深度和反射率图像，最终实现了 5 m 距离下 128×128 像素目标 12 Hz 的 3D 成像。2018 年石剑虹课题组提出了一种快速第一光子鬼成像的方案^[28]，同样用到了 TCSPC 相关单光子计数系统，他们的改进是利用 DMD 加载二值随机散斑图来调制脉冲激光源的空间强度。相比于第一光子成像的单点扫描成像机制，快速第一光子鬼成像方案的成像速度大大提高。虽然改进了成像速度，不过此系统仍有不足之处，基于此而成像的物体只能进行灰度成像，若对成像结果进行彩色图像重构则需要进行三轮测量，整体用时至少翻三倍。2020 年，Liu 等所提出的成像系统基于单光子探测的 SPI 技术^[3]，系统装置图如下 1-4 所示。在所采用的原理图中，一束激光照射目标，然后由透镜收集反射的光子，光点亮数字微镜设备(DMD)的可编程模式，信号光通过磨砂玻璃、滤光片和收集透镜，最后被单光子雪崩二极管(Single Photon Avalanche Diode, SPAD)探测器探测到。由于 SPAD 的接收面积有限，使用磨砂玻璃均质器来均匀光场的空间强度分布，最终可实现了对距离约为 100 km 的目标成像。针对光子计数形式单像素成像，上述工作均局限于灰度成像，实现基于弱光条件下光子计数型彩色单像素成像系统十分必要。

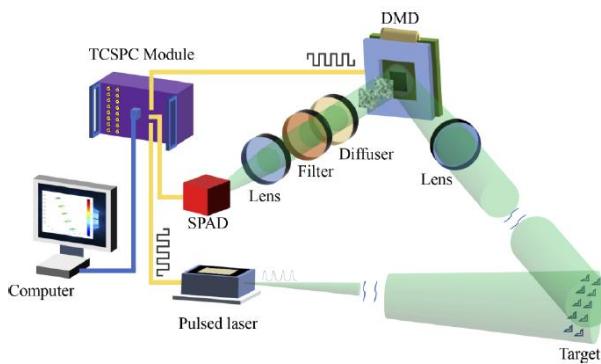


图 1-4 基于单光子探测的 SPI 系统(出自文献[3])

另一方面，得益于单像素成像新颖的计算成像优势，很多科研工作者将其应用到相位成像及复振幅成像领域。2013 年，Pere Clemente 等^[29]通过将相移干涉技术与基于压缩感知的单像素光学成像相结合，开发了光学波长数字全息术的框架。利用液晶空间光调制器对输入物体衍射后的光场进行 Hadamard 采样。然后采用单像素相机的概念，通过使用 Mach-Zehnder 干涉仪对采样衍射图样进行干涉成像。通过相移技术和反射光传播算法可获得测物体的复振幅，此系统实验过程用到了相移器件对参考光进行相移，整体光路不够简洁。2018 年，戴琼海课题组提出基于共路干涉的结构照明型单像素复振幅成像方案^[30]，该方案用 DMD 加载二值全息图进行复振幅调制，实现 $4f$ 系统过滤光路，而后利用二向色镜分光，形成相干结构照明。系统采用三步相移与 Hadamard 基扫描，直接获取物体的复值 Hadamard 频谱，再进行 Hadamard 逆变换重建物体的复振幅分布，结果与荧光测得的相位匹配很好，但是此系统毕竟是用 DMD 进行光调制，受其衍射效应影响，系统振幅调制效率过低，仅能达到总调制效率 10% 以内。2019 年，李福利课题组又提出了基于共路干涉的结构探测型单像素复振幅成像方案^[31]，他们将待测的复振幅图像编码于一个纯相位 SLM 上，经过 SLM 调制后的光场通过 $4f$ 成像系统成像在 DMD 表面。DMD 表面上设计的光栅图案使得一级衍射光中的信号光与参考光附加上可控相位差。当光束通过 DMD 和透镜时，使用光阑来挑选出一级衍射光，并阻挡其他级次的光。信号光与参考光在光阑所在平面处发生干涉。再利用一个光阑取出经物镜放大 40 倍后的干涉图案的中心点，并用一个不具有空间分辨能力的单点光电探测器记录光场强度。在 DMD 上加载一系列采样图案并检测进入单点探测器的相应强度值后，便可以重建光场的复振幅分布，此系统的实现用到了 DMD 与 SLM 两种光调制器件。2020 年中科大研究团队提出了一种单像素成像技术^[32]，可以通过傅里叶频谱采样从物体中提取相位，装置图如图 1-5 所示。该技术利用 DMD 扫描平面波，平面波与静止的参考光束干涉，在物体上产生变化空间频率，同步采用单像素探测器测量强度，采用四步移相采集光谱，最终对得到的频谱进行傅里叶逆变换，得到所需的相位图像。但此系统用到了两路干涉，且最终结果图像信噪比仍不够高，系统装置还有进一步优化空间。上述工作都是通过 DMD 进行相位复振幅成像，DMD 器件成像速度虽快，但在相位成像方面相比纯相位空间光调制器有明显劣势，故采用相应的相位型空间光调制器来调制空间光对相位物体进行单像素成像也十分有必要。

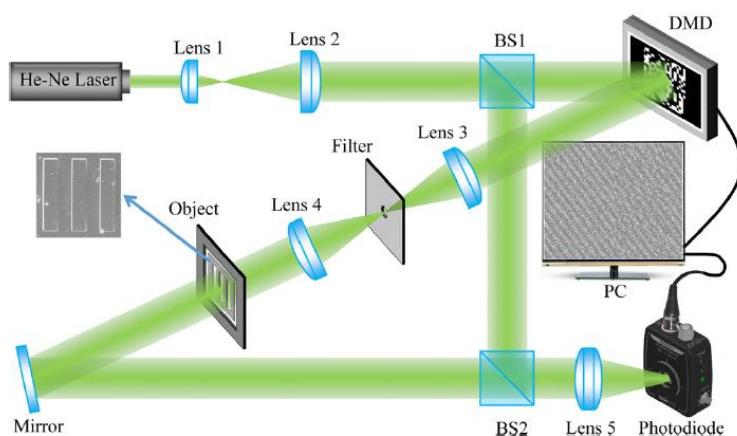


图 1-5 傅里叶频谱采样单像素相位成像装置图(出自文献[32])

2015 年暨南大学张子邦等人发表 “Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition”^[33] 基于傅里叶变换理论，提出通过获取傅里叶频谱来重建目标物体图像的技术。数字投影仪用四步相移正弦结构光模式照亮了场景，一个光电二极管收集来自现场的散射反射光，并将产生的信号输入计算机，用于图像的计算重建。使用了两个不同的检测单元进行图像重建，一个是覆盖了一块磨砂玻璃的光电二极管，另一个是反向放置的光电二极管，覆盖了一张 A4 白纸作为反射探测器。该方法通过对物体投射傅里叶变换基底图案，再使用一个单像素探测器获取反射光强，对得到的光强值进行一系列的计算进而得到目标物体在傅里叶域的频谱，最后对频谱进行傅里叶逆变换即可实现图像重建。图 1-6 下部给出了对目标物体采样率分别为 1%、10%、25%、100% 的图像重构，在全采样时，傅里叶基扫描单像素成像质量非常高，而且通过欠采样还可以根据成像需要提升成像速度。2016 年，他们又利用投影仪作为投影单元提出了一种单像素成像技术来进行 3D 重建^[34]。利用傅里叶空间频谱信息的稀疏性来减少测量任务量，通过对常规条纹投影轮廓术进行改进，利用 Helmholtz 互易实现边缘投影。用光电二极管取代不具有空间分辨的光源，投影仪来取代空间分辨探测器，最终能够使用单像素探测器来重建图像。此装置将投影仪单像素成像技术应用到了三维测量领域，但在成像结果和装置简化上并未取得明显进展。2018 年，上海理工大学提出“在课堂上实现基于激光投影仪和 Hadamard 矩阵的关联成像研究”^[35] 将通过激光投影仪作为光调制系统来展示最新成像方法和系统尝试推广到课堂，丰富系统了应用场景。在这些工作基础上通过选取性价比高效果更好的采集卡，更换系统核心计算

机，可以更广泛地扩大单像素成像技术应用场景，实现更高效率成像，甚至进一步降低成本。

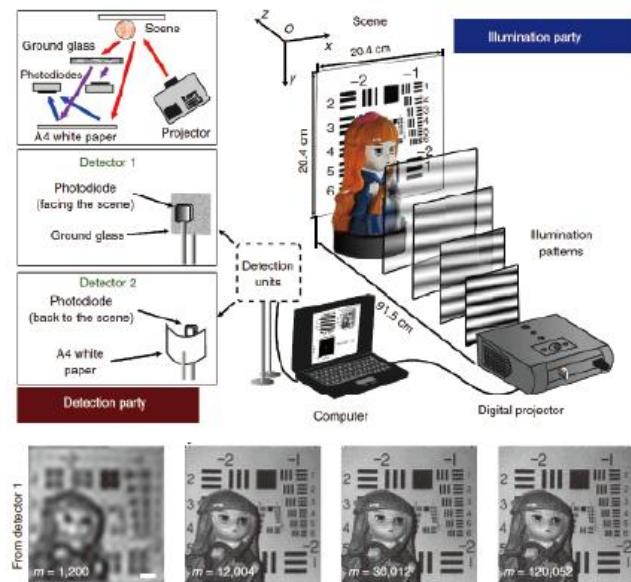


图 1-6 傅里叶基扫描单像素成像方案(出自文献[33])

综上，单像素成像已经逐渐发展成为一种重要的光电成像类别，有效弥补了传统光电成像技术的不足。已经被验证出可应用在红外成像^[37-40]、紫外成像^[41]、太赫兹成像^[42-46]、多光谱成像^[47-49]、显微成像^[50-51]、光学雷达^[52-54]、非视域成像^[55-56]、偏振成像^[57-59]、X 光成像^[60-61]光学信息加密^[62]等多个领域，相信在不久的将来单像素成像技术能够成为传统成像技术的有力补充。

1.3 本论文主要研究内容与章节安排

本论文针对单像素成像研究热点以及应用设计并实现了三种系统，分别是基于时间相关单光子计数器(TCSPC)的彩色单像素成像系统、基于纯相位调制的复振幅单像素成像系统和基于树莓派的单像素成像系统，三种系统用到了不同的空间光调制器件，各有其特点，可以很好地在前人工作的基础上推进单像素成像系统的应用，适用不同的科研实验场景。

第一章绪论介绍了单像素成像技术的发展史，主要介绍了课题的研究背景以及国内外发展现状。从双光子纠缠鬼成像到关联成像，从差分鬼成像到基扫描单像素成像，并根据单像素成像技术的优势为下文单像素成像系统的实现做了铺垫。

第二章主要介绍了本文中实现的几种不同的单像素成像系统中用到的方法和原理，包括 Hadamard 变换原理、结构照明成像方法和四步相移技术三部分内容。

第三章实现了基于 TCSPC 的彩色单像素成像系统，从系统装置的选择以及光路的实现做了主要介绍。系统充分利用了 TCSPC 优秀的时间分辨能力，对 DMD 调制后的激光脉冲光信号光子计数，通过时分复用原理使得系统可以分别对红绿蓝三种不同颜色分量光信号加以处理，最终在极弱光条件下通过单轮测量得到目标物体的全彩色图像。

第四章实现了一个复振幅单像素成像系统，在装置选择方面重点介绍了硅基液晶相位型空间光调制器，系统用此器件来调制光信号，未受到调制部分作为参考光，进而形成相干结构照明，并使用单个光电探测器记录目标光的零频率分量。实验结果表明，此系统具有较高的成像质量，能够准确获取目标物体的幅值和相位分布，在此基础上系统配置非常稳定，可确保长达数百分钟的图像采集。

第五章实现了基于树莓派的单像素成像系统，并且实现了基于树莓派的彩色单像素成像，主要介绍了系统核心树莓派，设计了相关电路实现到系统中，系统通过投影仪将 Hadamard 基底图案投射到目标物体上，选取性价比高，性能适配的光电探测器进行探测，采集的数据经过树莓派及相关电路的处理重构图像，实验结果充分说明了系统的可行性，此系统的出现将单像素成像技术成本大大降低，提高了单像素成像的技术成本优势。

第六章是全文总结，反思系统设计及实践中的不足，并对接下来的研究方向做出展望。

第二章 系统实现所用技术原理

单像素成像技术采用全局采样方式对物体空间信息进行编码，再通过单像素探测器对编码后的信息依次进行采集，最后通过计算对空间信息进行解码，重构物体图像。常用的图像重建方法有正交基扫描，压缩感知和深度学习等。本文所设计的单像素成像系统采用的是 Hadamard 正交基扫描方法。

2.1 Hadamard 变换原理

本文所实现的三个系统都是以 Hadamard 基底图案进行调制，然后利用单光子探测器记录物体的反射或透射光强序列，最后可得物体频谱。但是由于单像素成像是对光强进行调制，无法直接表达 Hadamard 基底矩阵中的负值，通常采用差分法或单步法^[55]来解决该问题。第一章中提到不同的单像素成像技术还有不同探测方法，三个系统在原理上同属于结构照明形式探测，即将图案调制后再照射目标物体，照射到目标物体上的光是带有 Hadamard 基底图案的调制光。

下面介绍 Hadamard 原理：

二维 Hadamard 变换及其逆变换的定义为

$$\mathbf{F} = \mathbf{HfH} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{f} = \frac{1}{N^2} \mathbf{HFH} \quad (2.2)$$

其中 \mathbf{f} 与 \mathbf{F} 分别代表物体的采样矩阵与其频谱矩阵，它们的行数与列数均为 N 。 \mathbf{H} 为 Walsh 序的 Hadamard 矩阵， N 是 Hadamard 矩阵的阶数，且 Hadamard 矩阵的阶数 N 仅能为 2 的整数次幂。Hadamard 变换式 (2.1) 可展开为

$$F(u,v) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} H(u,x) f(x,y) H(y,v) \quad (2.3)$$

式中 $u, v = 0, 1, \dots, N-1$ 。这里 $f(x,y)$ 和 $F(u,v)$ 分别代表物体的采样矩阵 \mathbf{f} 与其频谱矩阵 \mathbf{F} 的矩阵元， $H(u,x)$ 与 $H(y,v)$ 均为 Hadamard 矩阵 \mathbf{H} 的矩阵元。方便起见，引入 Hadamard 基底矩阵序列

$$\{\mathbf{P}_{uv} \mid u, v = 0, 1, \dots, N-1\} \quad (2.4)$$

其中基底矩阵 \mathbf{P}_{uv} 的矩阵元为

$$P_{uv}(x, y) = H(u, x)H(y, v) \quad (2.5)$$

其中 $x, y = 0, 1, \dots, N-1$ 。若将 Hadamard 矩阵 \mathbf{H} 的第 u 行与第 v 行的行向量分别记为 \mathbf{H}_u 与 \mathbf{H}_v 。则由式 (2.5) 可知, 基底矩阵 \mathbf{P}_{uv} 还可以表示为

$$\{\mathbf{P}_{uv} \mid \mathbf{P}_{uv} = \mathbf{H}_u^T \mathbf{H}_v, u, v = 0, 1, \dots, N-1\} \quad (2.6)$$

考虑到 Hadamard 矩阵 $\mathbf{H}^T = \mathbf{H}$ 。于是, Hadamard 变换式 (2.3) 可表示为

$$\begin{aligned} F(u, v) &= \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) P_{uv}(x, y) \\ &= \langle \mathbf{f}, \mathbf{P}_{uv} \rangle_F, \quad u, v = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (2.7)$$

其中 $\langle \cdot, \cdot \rangle_F$ 代表 Frobenius 内积, 即两个向量对应分量乘积之和。因此, 只要逐一测得物体采样矩阵 \mathbf{f} 与基底矩阵序列 $\{\mathbf{P}_{uv}\}$ 中每一基底矩阵的 \mathbf{P}_{uv} 的内积, 即可得到物体的 Hadamard 频谱 \mathbf{F} , 进而重构图像。

2.2 结构照明差分 Hadamard 单像素成像方法

单像素成像技术根据其光路结构, 可以被分为两类, 分别是结构探测式单像素成像和结构照明式单像素成像, 调制光先照射到物体再受到器件调制就属于结构探测式单像素成像, 调制光先受到器件调制再照射到物体上就属于结构照明式单像素成像。

在结构照明差分 Hadamard 单像素成像中, 首先将每个基底矩阵转化为正反两幅基底图案

$$\mathbf{P}_{uv}^{(+)} = \frac{1}{2}(1 + \mathbf{P}_{uv}) \quad (2.8)$$

$$\mathbf{P}_{uv}^{(-)} = \frac{1}{2}(1 - \mathbf{P}_{uv}) \quad (2.9)$$

将式 (2.8) 和式 (2.9) 这两幅基底图案依次加载到空间光调制器上, 对物体进行照明, 单光子探测器测得的光强分别为

$$D^{(+)}(u, v) = k \left\langle \mathbf{f}, I_0 \mathbf{P}_{uv}^{(+)} + I_b b(u, v) \right\rangle_F \quad (2.10)$$

$$D^{(-)}(u, v) = k \left\langle \mathbf{f}, I_0 \mathbf{P}_{uv}^{(-)} + I_b b(u, v) \right\rangle_F \quad (2.11)$$

于是有

$$F(u, v) = \alpha [D^{(+)}(u, v) - D^{(-)}(u, v)] \quad (2.12)$$

在成像过程中，将整套基底图案逐一加载到空间光调制器上分别对物体进行照明，再利用单光子探测器测得相应的调制光强序列，从而得到物体的 Hadamard 频谱矩阵

$$\mathbf{F} = \alpha [\mathbf{D}^{(+)} - \mathbf{D}^{(-)}] \quad (2.13)$$

最后再利用式 (2.2) 对频谱矩阵进行逆变换即可获取物体的重构像。

下图 2-1 展示了 4×4 像素的整套哈达玛基底图案，其中左边 16 幅为 $\{\mathbf{P}_{uv}^{(+)}\}$ 序列图，右边 16 幅为 $\{\mathbf{P}_{uv}^{(-)}\}$ 序列图共 32 张。

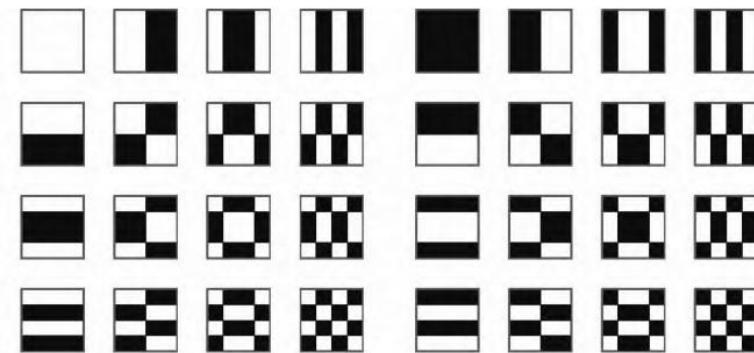


图 2-1 差分哈达玛基底图案 4×4 像素 $\mathbf{P}_{uv}^{(+)}$ (左 16) 和 $\mathbf{P}_{uv}^{(-)}$ (右 16)

2.3 零频探测与四步相移

在本论文中实现的相干结构照明的复振幅单像素成像系统中采用四步相移技术对 Hadamard 频谱进行采集。当 LCoS 面板显示 Hadamard 矩阵相位图像时，LCoS 面板反射光的复振幅将以 $E_0 P_{uv}$ 的形式出现，其中 E_0 为调制光的振幅，LCoS 面板直接反射光的复振幅可表示为 $E_r e^{j\phi r}$ ，其中 E_r 和 ϕr 分别为参考光的振幅和初始相位。因此，干涉场的复振幅可以写成

$$\mathbf{E}_{uv} = E_0 \mathbf{P}_{uv} + E_r e^{-j\phi r} \mathbf{1}, \quad (2.14)$$

其中 $\mathbf{1}$ 表示所有元素都为 1 且维数与 \mathbf{P}_{uv} 相同的矩阵。当目标物体被这种相干结构光照射时，光电探测器测量到的透射物光的零频率分量的强度可表示为

$$D(u, v) = \eta \left| \langle f, E_{uv}^* \rangle_F \right|^2, \quad (2.15)$$

其中 η 为光电探测器的量子效率， $*$ 为复共轭。将式(2.16)代入式(2.15)，考虑 $P_{00} = 1$ ， $D(u, v)$ 展开为

$$D(u, v) = \eta \left[I_0 |F(u, v)|^2 + I_r |F(0, 0)|^2 + 2\sqrt{I_0 I_r} \operatorname{Re} e^{j\Delta\phi} |F(0, 0)| F(u, v) \right], \quad (2.16)$$

其中 $I_0 = |E_0|^2$ 表示调制光的强度， $I_r = |E_r e^{j\phi_r}|^2$ 表示参考光的强度， $\operatorname{Re}\{\cdot\}$ 表示复数的实部。将 Hadamard 基矩阵 P_{uv} 的相位分别移 $0; \pi/2; \pi; 3\pi/2$ ，得到一组相移基矩阵

$$P_{uv}^{(\varphi)} = e^{j\varphi} P_{uv}, \varphi = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}. \quad (2.17)$$

用相移基矩阵 $P_{uv}^{(\varphi)}$ 调制的结构光照射目标物体，光电探测器的响应记为 $D^{(\varphi)}(u, v)$ ，通过微分计算可得

$$D^{(0)}(u, v) - D^{(\pi)}(u, v) = 4\eta \sqrt{I_0 I_r} \operatorname{Re} e^{j\Delta\phi} |F(0, 0)| F(u, v), \quad (2.18)$$

$$D^{(3\pi/2)}(u, v) - D^{(\pi/2)}(u, v) = 4\eta \sqrt{I_0 I_r} \operatorname{Im} e^{j\Delta\phi} |F(0, 0)| F(u, v), \quad (2.19)$$

其中 $\operatorname{Im}\{\cdot\}$ 表示复数的虚部。从光电探测器对相移 Hadamard 基矩阵的整体响应中，我们可以得到目标物体的 Hadamard 谱矩阵

$$F = \alpha e^{-j\Delta\phi} \left\{ [D^{(0)} - D^{(\pi)}] + j[D^{(3\pi/2)} - D^{(\pi/2)}] \right\}, \quad (2.20)$$

其中 $\alpha = 1 / \left[4\eta \sqrt{I_0 I_r} |F(0, 0)| \right]$ 。最后，根据式(2.2)对 Hadamard 频谱进行逆变换，可以重构目标物体的复透过率。

2.4 本章小结

本章简要介绍了 Hadamard 变换原理、结构照明差分 Hadamard 单像素成像方法以及零频探测四步相移原理。单像素成像核心的问题是测量基选取问题，相比较其它采样方式，Hadamard 基扫描的单像素成像方式具有多种优势，包括算法效率高，调制矩阵生成速度快，有助于利用差分测量降低成像误差等。

第三章 基于 TCSPC 的彩色单像素成像系统

在极弱光或弱光条件下，能接收到的光信号占比很低，单位时间内可探测的光子数少，运用传统成像方式很难将图像高质量重构出来，而单像素成像技术较传统成像方式而言，在弱光条件下可取得更高的信噪比。在这种背景之下，本章节介绍实现了一种利用时间相关单光子计数技术通过单像素成像实现极弱光探测彩色物体的装置。此方案充分利用了 TCSPC 的时间分辨能力，并与时分复用原理相结合，以极高的效率获得探测物体的全彩图像。

3.1 系统装置选取

单像素成像的本质是利用单像素探测器件探测光强信号，那么在弱光条件下设计相关的系统首要就是要保持系统装置的灵敏性，尤其在实验装置的选择上，首要就是保证高效灵敏的探测。

此系统中最重要的核心器件是光子计数装置。光子探测领域的应用发展对探测器灵敏度的要求不断提高，当光信号微弱到单光子级别时，只有采用光子计数的方式对光子进行探测。光子计数技术是利用弱光照射下单像素探测器输出电信号自然离散的特点，采用脉冲甄别技术和数字计数技术把微弱的信号识别并提取出来。时间相关单光子计数(TCSPC)技术是在光子计数技术的基础上发展起来的一种单光子探测手段，尤其适用于微弱光信号的探测。

PicoHarp 300 是一款高端易用、即插即用的时间相关单光子计数系统，装置如图 3-1 所示。它通过 USB 2.0 接口连接到电脑端，并且拥有两个相互独立的同步通道和探测通道，每秒可实现 1000 万个计数，触发脉冲宽度为 0.5 ns 至 30 ns，计时精度 $<12\text{ ps rms}$ ，定时精度 $<8.5\text{ ps rms}$ ，其计时精度可与光电倍增管(PMT)、单光子计数模块(SPCM)等主流单光子探测器匹配使用。它的工作过程是使用一个同步信号源驱动激光器，出射光脉冲照射目标物体，再利用光子探测装置(多为光电倍增管)对光信号进行探测，每一个光子计数信号在 PicoHarp 中都会落入对应的时间窗口，最后将记录到的信号发回到电脑端进行处理。



图 3-1 PicoHarp300 装置

图中 Channel 0 接口连激光脉冲同步信号，Channel 1 接口连光子探测器信号，USB 2.0 接口连接电脑，PCIe 接口连接 DMD。PicoHarp300 装置会对激光器每一束脉冲激光同步信号，DMD 翻转，探测到光信号的时刻进行记录。为了搭配系统整体使用，上述 PicoHarp300 装置还连接有一个时间延迟器，其通道设置有延时功能，调节范围 $\pm 100 \text{ ns}$ ，调节精度为 4 ps ，通过延迟器可将记录到各种信号进行时间延迟，使得记录到光信号的时刻发生在相邻两束脉冲光发出的间隔，清晰辨别出每一束脉冲光是否最后到达探测器。

实际上，极弱光条件下许多周期内根本就没有光子。概率上描述，光子或空循环的出现是完全随机的。而因为单像素探测器在探测到一个光子事件后至少有几纳秒的死机时间，在这段时间内，它不能处理其他事件，所以尽量要保证每个周期只出现一个光子。如果一个激发同步周期内记录的光子事件数量大于 1，由于死时间的存在，TCSPC 模块就有可能只记录第一个光子事件，错过后面的光子事件，造成所测得的数据不准确，出现“堆积效应”。为了避免这种情况的发生，可以设置单像素探测器上的平均光子计数率应为激光器重复频率的 1%—5%，这样就可以使得 TCSPC 系统每个激发同步周期只记录一个光子。将延迟时间划分成相等时间间隔的时间区间，根据测到的光子事件相对于激光同步脉冲到达的时间，在对应的时间区间进行计数累加，每测到一个光子，计数就加 1，根据多个激光同步脉冲统计，就可以得到光子到达时间统计分布。

考虑运用到时分复用原理，而且基于要实现的单像素成像系统是要实现彩色成像的特性就需要一个可以同时出多波长且频率可调节的脉冲激光器。本系统所采用的激光器——NKT-Extreme 超连续皮秒脉冲激光源，如图 3-2(a)，它的超连续谱源可提供广

泛的光谱输出，覆盖数百纳米，它的输出光谱如图 3-2(b)所示，工作波段从 260 nm 到 2400 nm，此激光器还有可调节的重复频率从 2 MHz-78 MHz，典型光纤耦合率也在 70%以上，同时保持单线激光器已知的高亮度和模式质量。在操作使用上，平台是完全模块化的，可以简易操作，无需配置即可添加附件模块，即插即用。

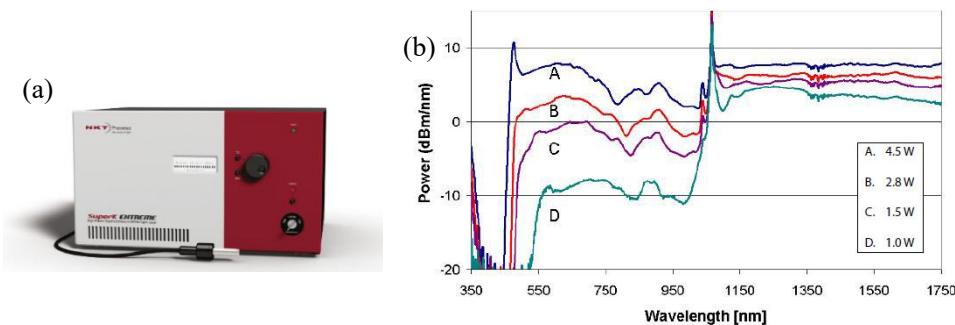


图 3-2 (a) NKT-Extreme 超连续皮秒脉冲激光源；(b)激光器输出光谱

图 3-3 是激光器控制面板及光谱曲线。图 3-3(a)是多线滤波器面板，激光器输出激光可以通过滤波器过滤出需要的波长波段，图中可以看到最多可过滤出八种不同波长，并提供多波长的同步输出，控制各个输出光的相对功率。通过控制面板对激光器输出功率的调节，见图 3-3(b)，在波长选取时，本系统选择了 480 nm、550 nm 和 670 nm 三个主色波长，并控制其输出光强到基本一致。由图 3-2(c)可以看出，功率在 1.5 W 以上时图中 A、B、C 部分在可见光三色红绿蓝颜色波段变化平缓，此激光器在波长输出上适合系统实现。除此之外，选取这三个波长是由于它们足够还原目标物体真实色彩，而且透射物体光的光谱曲线在这三个波长段强度平均。如图 3-3(c)，在利用单像素探测器探测光信号时，利用时间相关光子计数做光子到达时间的记录即可。

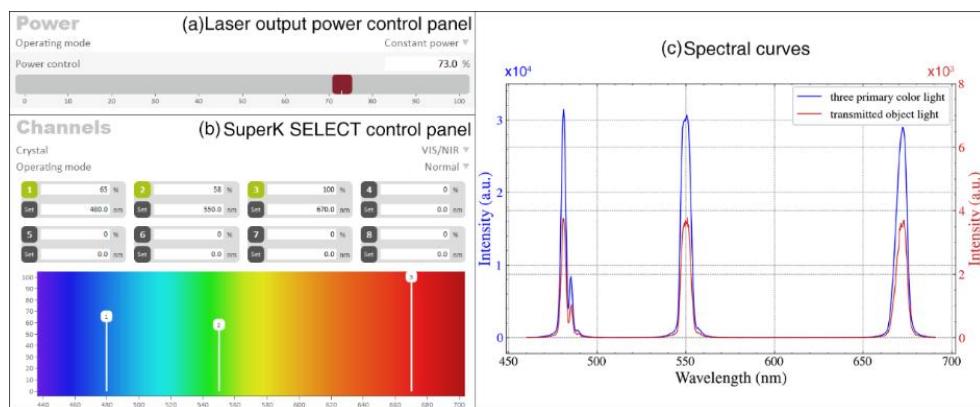


图 3-3 (a)多线滤波器控制面板；(b)激光器功率控制面板；(c)三原色脉冲光和透射物体光的光谱曲线

系统的工作过程中，激光器会与时间相关单光子计数模块相连，激光重复频率设置有几个挡位可调，当设置为 15.6 MHz 挡位时，两个激光同步脉冲时间间隔是 $1 \times 10^9 / 1.56 \times 10^7 \approx 64.1$ ns，有时间延迟器可将红绿蓝三色光信号接收时间间隔控制在 64 ns 内，由此就能区分开每一束脉冲光信号。

在探测装置的选取上，系统是要实现在低能级光信号下准确测到光子。在科研实验中常见的单像素探测器以下几种：光电倍增管(Photon multiplier tube, PMT)、单光子计数模块(Single-photon counting module, SPCM)、真空光电二极管(Vacuum avalanche photon diode, VAPD)、超导单光子探测器(Super-conduction single photon detector, SCSPD)等。

本系统的选择是 PMT，光电倍增管也是一个可以将微弱的光信号转换成电信号输出的器件，具有极高的灵敏度、超快的响应时间、高增益、低噪声等优点，尤其适合应用在极弱光成像领域。市场上 PMT 的型号不尽相同，不同型号的 PMT 工作环境也不一样，图 3-4 给出了滨松公司的两种常用的光电倍增管 PMTH-S1-R928 型光电倍增管实拍和 R955 型光电倍增管典型的光谱响应曲线。实验所选取的三色波长附近 PMTH-S1-R928 型光电倍增管变化更为平缓，对于本系统的实现选取使用的是 PMTH-S1-R928 型光电倍增管。这种光电倍增管量子效率高，光窗大，光谱范围很宽可达到 185-900 nm，光阴极材料为多碱，峰值相应波长在 400 ± 30 nm，阴极灵敏度峰值是 74 mA/W，单次增益可放大 1×10^7 倍，一般要经过十余次以上的倍增，形成较大的光电流信号被阳极接收并输出，整个过程时间约 10^{-8} s。

PMTH-S1-R928 型光电倍增管是一种加压式光电倍增管，一般加压到 950 V 以上进行工作，且响应时间足够快，通过 TCSPC 系统模块我们可以将这些时刻和光脉冲发出的时刻比较，区分不同波长光并进行计数，用时最短的是用到光纤长度最短的，用时最长的是用到光纤长度最长的，用时在中间的就是用到光纤长度适中的。

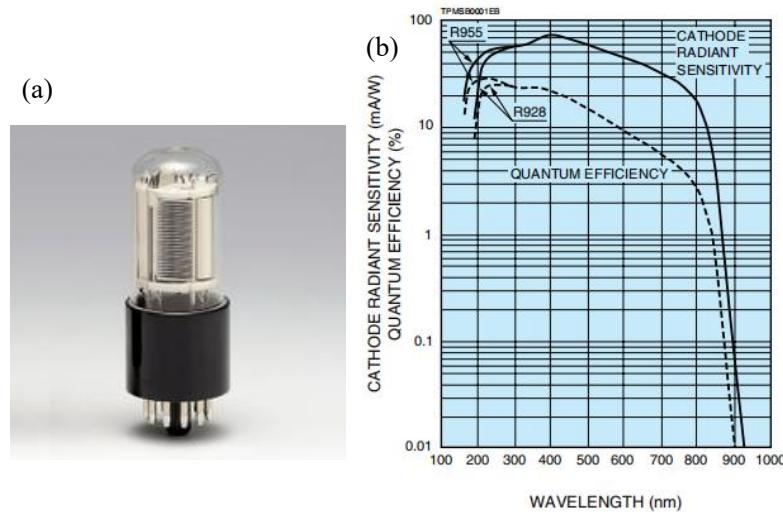


图 3-4 (a)PMTH-S1-R928 型光电倍增管探测器; (b)R928, R955 光电倍增管探测器阴极辐射灵敏度量子效率随波长的响应变化曲线

本系统中还应用到的关键器件有数字微镜器件 DMD 图 3-5(a), DMD 是光开关的一种, 可以实现电信号输入、光信号输出的平面显示器件。系统中用到的型号为辛同科技 F4100, 此型号 DMD 器件接口丰富, 具有千兆网、DVI、USB2.0、CAN、串口等接口, 开发更加灵活, 具有更高的性价比。它工作时可以对 350nm—2700nm 的光进行调制, 分辨率大小为 1024×768 。原理如图 3-5(b)所示, 利用旋转反射镜实现光开关的开合, 光从光纤中出来, 射向 DMD 的反射镜片, DMD 打开的时候, 光可经过对称光路进入到另一端光纤; 当 DMD 关闭的时候, DMD 的反射镜产生一个小小的旋转, 开闭时间仅有微秒量级, 这个选择的时间也仅为 1.2×10^{-5} s, 光经过反射后, 无法进入对称的另一端, 也就达到了光开关关闭的效果。

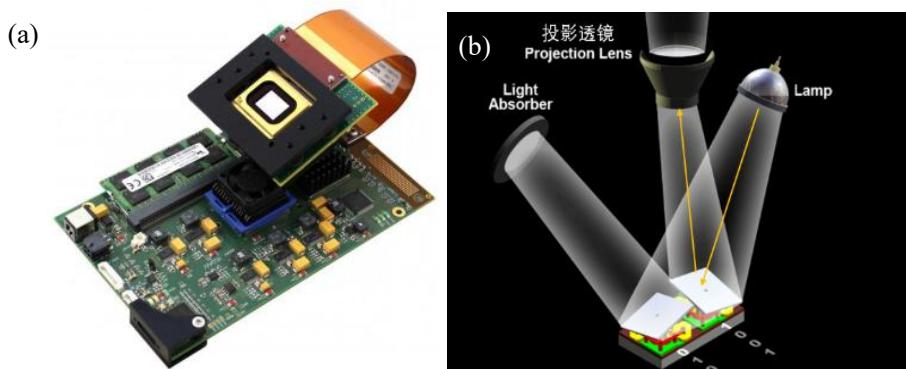


图 3-5 (a)DMD 装置图; (b)DMD 工作原理图

DMD 为内同步循环显示，它的运行要加载上在程序里生成好的 Hadamard 图案然后自动循环播放，播放速度超过 15 KHz，当脉冲光入射到 DMD，经过 DMD 加载的基底图案调制，微镜反射的调制光会透过物体进行后续探测。

加载图案的数量理论上来讲是像素数的平方，像素越高自然后续出来的图像更清晰，而微镜翻转需要时间，理论上来说，有可能在它翻转的过程里发生测量，造成结果不准确的情况。针对这种情况，在系统中加载 Hadamard 图案时每一张图案后再加载一张全黑图，即 DMD 加载完一张基底图微镜会全部翻转到一面，然后再翻转加载下一张 Hadamard 图案。由此如果选择 $N=32$ 像素进行实验，那么需要加载的图案便是 $32 \times 32 \times 2 \times 2 = 4096$ 张图，选择 $N=64$ 像素那么需要加载的图案便是 $64 \times 64 \times 2 \times 2 = 16384$ 张图，当选取 $N=128$ 像素时，DMD 储存系统会饱和，故 $N=64$ 像素便是最佳选择。

系统运行时，DMD 会在 TCSPC 模块记录脉冲光开始前运行，镜面每加载一张图案，光子计数模块会做一次记录传到电脑，类似一个“记事本”清晰地辨开光脉冲最后到达 PMT 是基于哪张 Hadamard 图案。为了进行一轮 16384 张图的完整测量，TCSPC 模块收到 DMD 新一轮循环开始的信号时，电脑端程序会以这次翻转信号为准，将后续测得的记录信号分离出来做成像计算。

3.2 系统实现

3.2.1 时分复用技术

时分复用技术(Time-Division Multiplexing, TDM)是将不同的信号相互交织在不同的时间段内，沿着同一个信道传输；在接收端再用某种方法，将各个时间段内的信号提取出来还原成原始信号的通信技术，图 3-6 为其原理图，这种技术可以在同一个信息通道上传输多路信号。

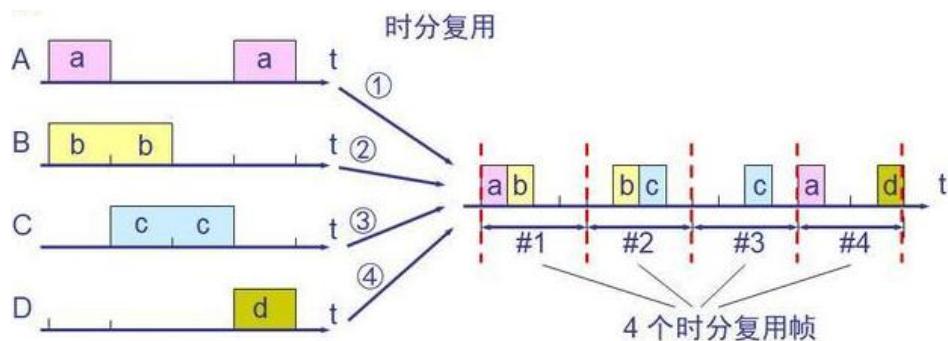


图 3-6 时分复用技术原理图

在本系统中搭建的基于 TCSPC 的彩色单像素成像系统中应用了 TDM 原理，将激光器发出的三色脉冲光在传输时间上区分开，最后再耦合回同一根光纤里。

该单像素成像方案使用数字微镜器件调制具有预设延迟的激光脉冲序列，实现三色结构照明，然后将 TCSPC 模块连接 PMT 实现光子计数检测，利用 TCSPC 的时间分辨能力对光谱图像编码信号进行解调，最后可在一轮测量中重构高质量的全彩图像。

3.2.2 系统光路实现

系统的光路装置设计如图 3-7 所示，为实现极弱光环境，系统是在绝对黑暗的室内环境下运行。将超连续皮秒脉冲激光器的重复频率设置为 15.6 MHz，选择三个中心波长分别为 480 nm、550 nm 和 670 nm 的单色脉冲光，并将三种颜色的光强度调整均匀。脉冲激光光源发出脉冲光，再由内置滤波器将脉冲光过滤出所选取三个中心波长，用两个二向色片将不同波长的光分离开，若分离的光颜色不纯，可加上滤光片进行过滤。根据时分复用原理，这里将蓝色脉冲光连接了较短的光纤跳线，将绿色连接了长度适中的光纤跳线，红色连接了最长的光纤跳线。将三束脉冲光时分复用后耦合到一根光纤里照射到 DMD 进行 Hadamard 调制，调制后的光再通过透镜穿透用菲林片上刻蚀的彩色物体，这样就实现了调制光对彩色物体的照明，假设光脉冲照射到红色部分，其他部分波长的光会被吸收，红色脉冲光会透射物体，接下来 PMT 进行光子探测，TCSPC 对系统运行进行时间方面记录。

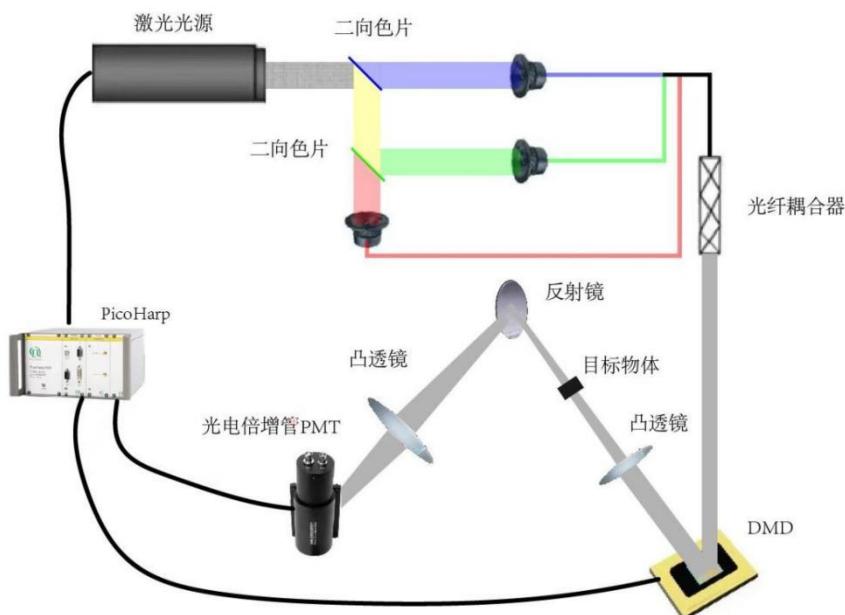


图 3-7 系统的光路图

图 3-8 为光路前半部分实拍图。激光器输出的光是含三种波长的光脉冲信号。输出光束经反射镜反射，被二向色片分到三个延迟路径上。在实验过程中可能是由于二向色片设计不够严密，发现经由二向色片分离出来的单色光中含有杂散光，故在延迟路径上二向色片分离出来的光后加置了滤光片，经由滤光片过滤的光便拥成了纯度很高的单色光。

图 3-9 为光路后半部分的实拍图，产生了时间延迟的三色耦合光照射 DMD 后反射透过彩色目标物体，然后光信号会经过衰减片，使得探测装置能够在工作信号下运行。TCSPC 模块记录激光器的周期性同步信号，记录来自 PMT 的光子事件以及来自 DMD 的标记信号，为了提高光子检测效率，使得物光强度透射均匀分布，在 PMT 前边还放置有一块毛玻璃。TCSPC 模块在时间标记的时间分辨模式下工作，因此每个光子事件相对于前一个激光同步事件的延迟时间在皮秒的分辨率下被记录。电脑中利用 Python 设计的软件程序会对 TCSPC 从实验开始的同步事件，对光子事件和标记事件处理后进行图像重建。

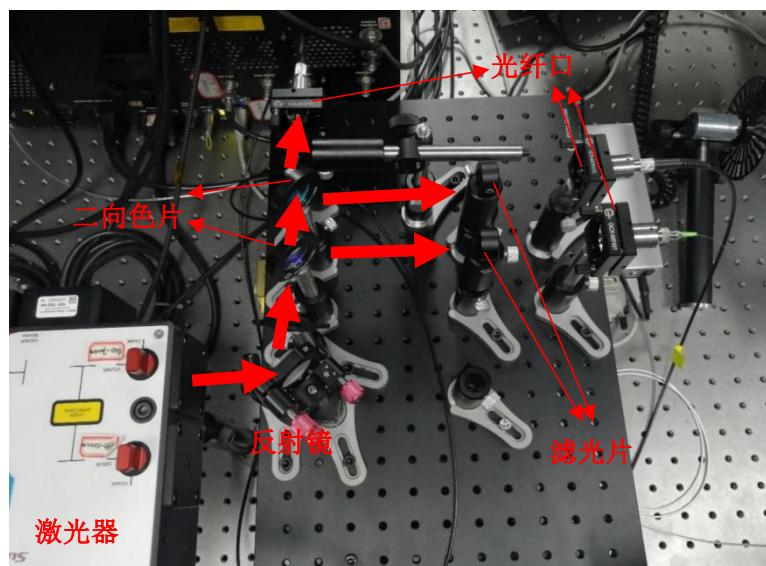


图 3-8 基于 TCSPC 实现的单像素成像系统光路实拍图

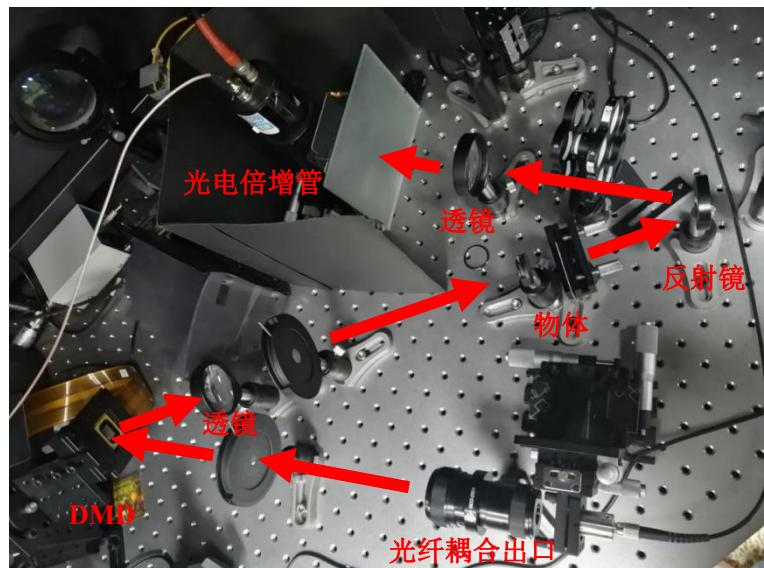


图 3-9 基于 TCSPC 实现的单像素成像系统光路实拍图

3.2.3 信号处理模块实现

DMD 端还和系统的横向分辨率有关，图 3-10 是 DMD、会聚透镜和目标物体几何关系。

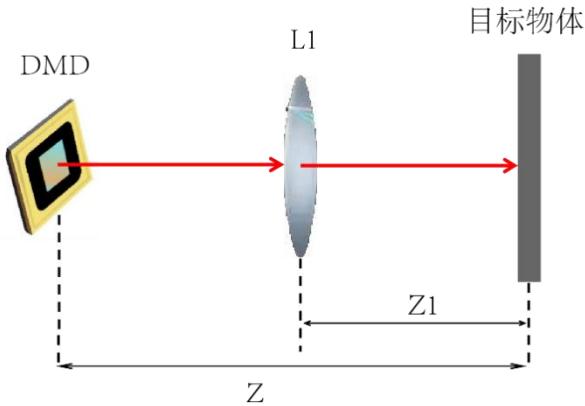


图 3-10 DMD、会聚透镜 L_1 和目标物体几何关系图

为了保证目标物体到 DMD 表面是清晰的，上述参数需满足高斯薄透镜公式 $1/f_1 = 1/Z_1 + 1/(Z - Z_1)$ ， L_1 的焦距是 $f_1 = 10 \text{ cm}$ ，会聚透镜 L_1 与目标物体之间的距离取 $Z_1 = 34 \text{ cm}$ ，目标物体与 DMD 之间的距离为 $Z = 47.5 \text{ cm}$ 。这样算出来系统的横向放大率为 $Z_1/(Z - Z_1) \approx 2.52$ ，DMD 加载的图案在物体上呈正立放大的像。

DMD 要加载上 Hadamard 基底图案对光场进行调制，若实验中单个像素放大倍数设为 3，这样 3×3 个微镜将作一个调制单元，其驱动信号具有相同的正负值，翻转方向相同。每个调制单元边长为 $13.68 \times 3 = 41.04 \mu\text{m}$ 。经 DMD 后的调整光通过透镜照射

到物体表面，且可以保证物体表面的 Hadamard 基底图案是清晰的。根据系统的横向分辨率公式，计算得物体表面的 Hadamard 图案大小 $\delta_x = a Z_1 / (Z - Z_1) \approx 103.42 \mu\text{m}$ ，则该实验系统所能实现的最小横向分辨率为 103.42。若将 6×6 个微镜作为一个调制单元，则每个调制单元边长为 $13.68 \times 6 = 82.08 \mu\text{m}$ ，该实验系统所能实现的最小横向分辨率为 $\delta_x = a Z_1 / (Z - Z_1) \approx 206.72 \mu\text{m}$ 。总结下来通过系统分辨率由 DMD 微镜调制单元的大小、会聚透镜的焦距，目标物体与 DMD 之间的距离决定。

在实验过程中，每个光子都有唯一与之对应的激光同步信号，同步信号触发的时刻标记开始，在下一个同步信号到来前，有光子到达则标记结束，延迟时间其实就是这个过程光子发生标记信号发生到结束持续的时间。

系统中 TCSPC 模块记录超连续脉冲激光器的周期性同步信号，PMT 检测记录每个光子的出现，TCSPC 模块的记录来自 PMT 的光子事件和来自 DMD 的标记信号，通过这种方式可以获得到光子相对激光同步脉冲的延迟时间。图 3-10 给出了程序面板对分离到的各类信号截图。Type 表示工作状态，CHN 表示加探测器探测到了光子，MAR 表示 DMD 镜面翻转信号，从一个 MAR 信号到下一个 MAR 信号是一张基图案测得的数据；MarNum 中 0 表示 Hadamard 正基底图案，1 表示 Hadamard 逆变换图，本系统用到的 Hadamard 差分成像便是由正图减去逆图得到；TimeTag 显示的是光脉冲到达时间，可以看出 TCSPC 可以清晰分辨每一束脉冲光，且并非全部脉冲光都为 PMT 所探测到。最后 DTime 是延迟时间，相较于 TimeTag 时刻后续用时多久探测到光信号，由图中数值可以明显辨别，哪一时刻收到了哪种颜色波长光，在图中不同波长到达时间数值大小由相应颜色方框做了标记，时间较长的在延迟 48 nm 的部分属于光信号在长光纤中传播的红脉冲光，时间适中的延迟 24 nm 的部分属于经过光纤长度适中的绿色脉冲光，所用时间最短的也就是用最短光纤长度传播的无时间延迟属于蓝色脉冲光。

	Type, Ch,	MarNum,	TimeTag,	DTime
583	CHN, 1,	0,	8349,	1638
584	CHN, 1,	0,	8357,	3153
585	CHN, 1,	(+)	8368,	3124
586	CHN, 1,	0,	8372,	1676
587	CHN, 1,	0,	8389,	3140
588	MAR, 1,	1,	8526	
589	CHN, 1,	1,	24035,	1686
590	CHN, 1,	1,	24061,	1674
591	CHN, 1,	(-)	24065,	167
592	CHN, 1,	1,	24070,	1660
593	CHN, 1,	1,	24087,	3104

图 3-11 程序面板分离到的各类信号

测量进行图案重构的过程以图 3-11 举例，图中 MarNum 一栏 Hadamard 正基底图案部分记作(+)，Hadamard 负基底图部分记作(-)，图中标得蓝光在(+)部分计数为 0，在(-)部分计数为 1，这里标得红光在(+)部分计数为 3，在(-)部分计数为 1， $F_R = 3 - 1$ ，标得绿光在(+)部分计数为 2，在(-)部分计数为 3，这里 $F_G = 2 - 3$ 。当整一轮测量完成程序将 F_B 、 F_R 、 F_G 组数据整理为三个数字矩阵，矩阵的大小和测量数值多少有关主要由程序中设置的像素值大小决定，在实验中用到的是 64×64 像素，故可得到三个 64 行 64 列的矩阵。图像重构过程是通过以下 Hadamard 逆变换公式得到

$$\mathbf{f}_G = \frac{1}{N^2} \mathbf{H} \mathbf{F}_G \mathbf{H} \quad (2.21)$$

$$\mathbf{f}_B = \frac{1}{N^2} \mathbf{H} \mathbf{F}_B \mathbf{H} \quad (2.22)$$

$$\mathbf{f}_R = \frac{1}{N^2} \mathbf{H} \mathbf{F}_R \mathbf{H} \quad (2.23)$$

图 3-12 给出了 TCSPC 模块记录每个光子事件相对于激光同步脉冲的延迟时间进而画出的相对于延迟时间的光子计数直方图。图中位于蓝、绿、红阴影区域的光子计数分别是由透过目标物体蓝、绿、红的光脉冲产生的，在系统中真正作为光信号的是用彩色渲染部分。图中这些主峰的宽度约为 3 ns，由 TCSPC 系统的响应时间决定，而主峰之间的间隔约 24 ns，这是由延迟路径之间的光路差即延迟路径中的光纤长度决定。

三个光脉冲总延迟时间应保持在 64 ns 以内(在 3.1 部分计算得 15.6 MHz 下两个脉冲光之间时间差是 64 ns) 到达 PMT, 当然也有可能出现光子最终到达不了 PMT 情况, 但对于此系统来说, PMT 真正测得的光子才是有意义的。主峰后三个小峰值是由于 PMT 的后脉冲而形成的假信号。

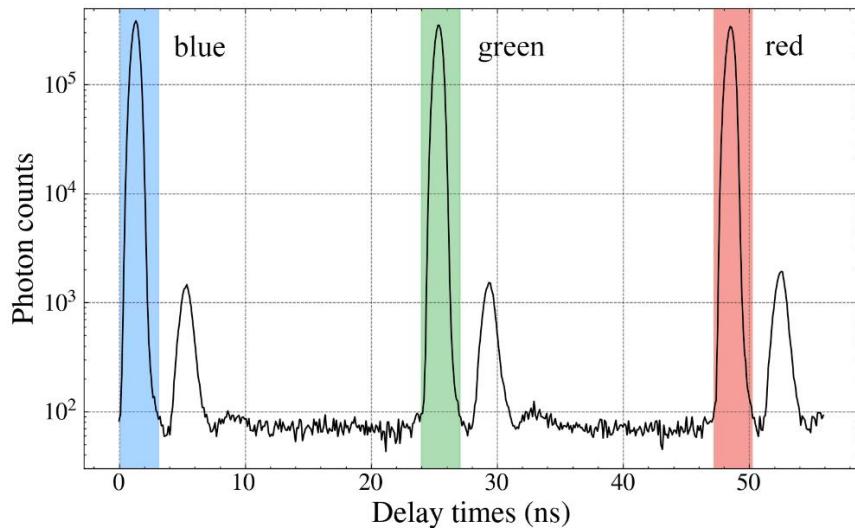


图 3-12 图像采集过程中光子计数与延迟时间的柱状图

3.2.4 系统软件设计

以下给出了用 Python 程序实现的系统软件部分, 图 3-13 为此流程框图。此部分的 Hadamard 图案是在系统运行前全部生成加载到 DMD 里循环显示, 由于整套 Hadamard 图案第一张图是全白图, 故重构的时候, 全白图案作为标记图案, 测得的光强最大, TCSPC 很容易区分出来每一轮显示的开始。投影的所有图案数量是加载到 DMD 里的所有图案总数, 为 $N \times N \times 2 \times 2$, 当 N 取 64 时, 共有 16384 张图需要显示, 程序可以甄别出 TCSPC 系统在全白图记录之后的 16384 次记录, 这时所记录的所有数据就是完整一轮的测量数据。

TCSPC 记录的信号包括, 每一束激光脉冲发出时刻信号, DMD 翻转时刻信号, PMT 探测到光子信号时刻, 并通过程序将不同时刻接收到的光信号时间差计算出来。图案重构是按照第二章中 Hadamard 逆变换原理对分离出来的三色光分别进行图案重构, 最后将红绿蓝三个单色矩阵, 按顺序堆叠成一个三维矩阵, 即可得到全彩图像。

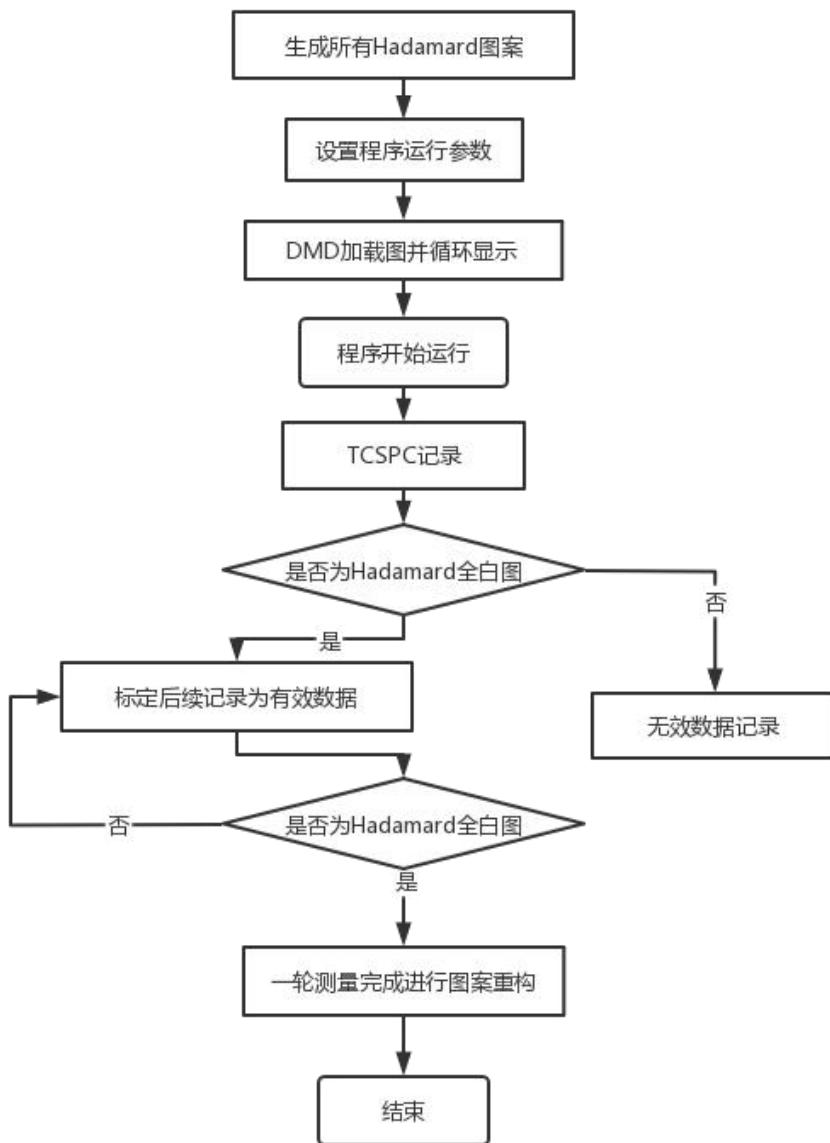


图 3-13 系统软件部分流程框图

3.3 系统测试

装置搭建完成后，实验验证基于 TCSPC 的彩色单像素成像系统成像结果，通过公式(2.14)-(2.16)Hadamard 逆变换重建 B、G 和 R 分量图像，如图 3-14(a)—3-14(c)所示。最终的全彩图像，如图 3-14(d)所示，具有良好的成像质量，整个实验过程用时在 20 s 内，实验证明了系统的可行性。

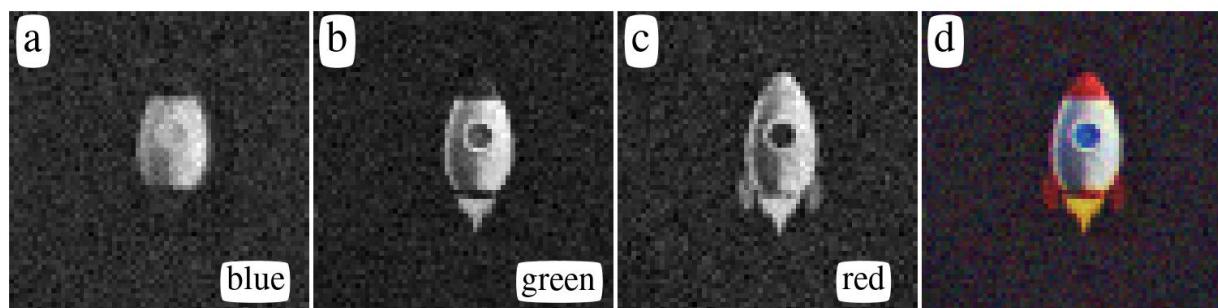


图 3-14 基于 TCSPC 的彩色单像素成像系统实验结果

3.4 本章小结

这一章搭建的是基于 TCSPC 的彩色单像素成像系统，内容上重点介绍了系统实验装置的挑选，系统光路的实现，整个过程由 TCSPC 进行时间辨别记录。并利用 Python 程序设计，最后给出了实验结果，实验结果表明，按照这种方法搭建的系统成功实现了以单光子计数技术为基础单轮测量下的彩色单像素成像。在此方案的基础上，系统可进一步使用 Hadamard 单步测量、高速投影和欠采样等方法来提高成像效率，并且在极低的光照度下，这个方案还可以被其他计算成像提供技术参考，实现多光谱成像。

第四章 相干结构照明的复振幅单像素成像系统

本章采用相位型空间光调制器(SLM)进行相位调制，搭建了相干结构照明的复振幅单像素成像系统(Complex-amplitude single-pixel imaging, CSPI)，SLM 在复杂振幅调制方面比 DMD 更具竞争力，具有更高的调制效率，成像质量以及更简洁的光路结构。

4.1 系统装置选取

4.1.1 硅基液晶空间光调制器

系统实现需要的关键器件是硅基液晶空间光调制器(liquid-crystal-on-silicon spatial light modulator, LCoS-SLM)，系统选取的空间光调制器 (Pluto-Vis, Holoeye)的分辨率是 1920×1080 ，每个像素宽度为 $8 \mu\text{m}$ 。图 4-1 所示为其结构图，它由许多独立单元构成，主要分为玻璃基底、透明电极、定向层、液晶层、绝缘反射镜和硅底板。定向层获得液晶分子的特定取向，透明电极由铝制成可作为反射光的镜面。液晶层由电压控制，由于液晶具有电致双折射效应，故可通过控制液晶分子的等效折射率，实现对入射光的相位控制来产生不同的相位调制。最后硅基底板的作用是将像素化的电场传输到液晶分子。

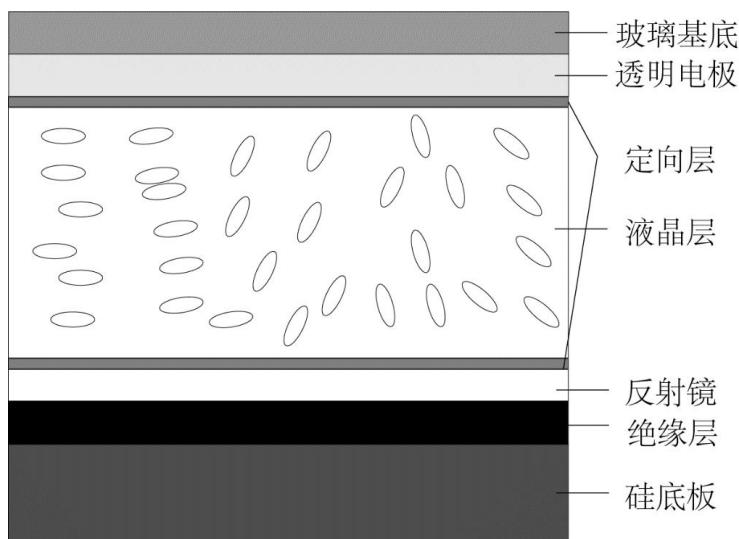


图 4-1 硅基液晶空间光调制器结构图

LCoS-SLM 可以利用电压控制液晶，当波长 λ 的线偏振光穿过厚度 d 的液晶层时，垂直入射光经过液晶盒时产生的 e 光与 o 光之间的相位差可以通过以下公式获得：

$$n_e(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}} \quad (4.1)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d [n_e(\theta) - n_o] dz \quad (4.2)$$

其中, n_e 为液晶分子长轴非常光折射率; n_o 为短轴方向寻常光折射率; θ 为未加电场时液晶分子长轴与外加电场时液晶分子长轴的夹角。

图 4-2 给出了液晶分子偏转示意图, 根据式(4.1)液晶等效折射率 n_e 会随液晶分子倾角 θ 变化, 而 θ 角的大小取决于液晶两端所加电压, 即光束相位可通过控制 LCoS-SLM 的电压改变光束在液晶中相位延迟量得到调制。

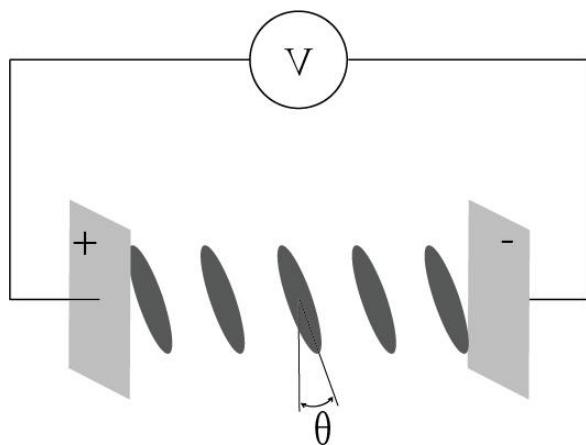


图 4-2 液晶分子偏转示意图

4.1.2 硅基液晶空间光调制器相位闪烁及伽玛校正

系统所用到的相位型空间光调制器是数字寻址, 相位电平由脉冲编码调制产生, 这种数字特性一方面使得调制器拥有成本效益较大的驱动单元, 但另一方面引入了特定的相位闪烁, 出现相位闪烁的原因是 LC 分子的有限粘度, 这使得它们能够以很小的比例跟随每一个脉冲, 其频率达到设备刷新率(60 Hz)的几倍。技术的有限带宽允许较短序列比较长序列在一帧内更频繁地寻址, 这会直接影响寻址频率, 寻址频率越高, 闪烁越低, 结果是使用时必须在闪烁振幅大小和不同相位电平的数量之间做出权衡。器件最长寻址序列只允许一帧内寻址两次, 频率为 120 Hz, 这个序列支持 $(18+1) \times 2^6 = 1216$ 个不同的查找表值, 这是最长的可用序列, 可以选择其中的 256 个值进行调制。如图 4-3(a)显示了此默认配置下的典型闪烁示例。最短可用序列一帧内寻址八次, 为 $(0+1) \times 2^6 = 64$ 这会导致最低的闪烁, 如图 4-3(c)所示, 但也提供了最低的可辨相位水平。

实际应用中考虑到要减小相位闪烁而同时为保持较高可辨相位水平，在下文的实验中用到的是如图 4-3(b)所示，“5-5”默认配置下的序列寻址，这个序列允许 $(5+1) \times 2^5 = 192$ 个不同的查找表值。对于大多数应用程序来说，有 5 位的相位电平就足够了，但对于一些可能需要“18-6”配置的应用程序来说，这可能还不够。“5-5”配置比“18-6”配置显示了更低的位深度，可以在一帧内寻址 5 次，这增加了寻址频率，因此与“18-6”配置相比显著减少了相位闪烁。

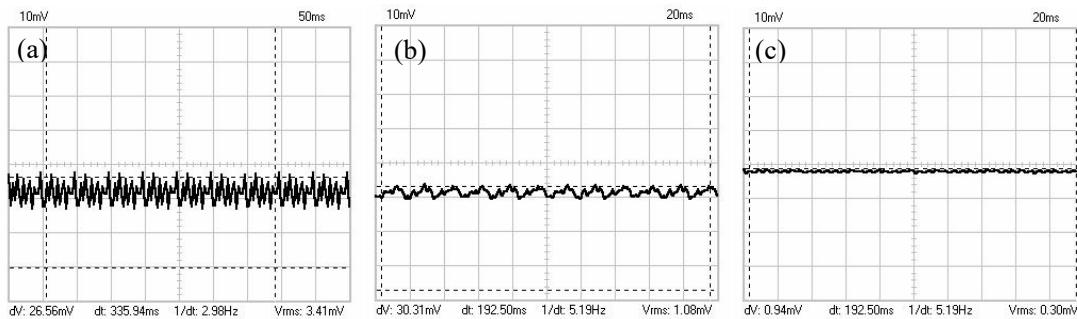


图 4-3 不同配置下空间光调制器调制信号相位闪烁情况 (a) “18-6” 配置序列寻址;
(b) “5-5” 配置下的序列寻址; (c) “5-5” 配置下的序列寻址

一旦选择了所需的序列和电位器设置，就应该进行伽马校正，以便将器件响应设置为精确的相位值和相位响应的线性，图 4-4(a)给出了应用伽马校正前调制相位值随灰度值变化曲线，由图中可以观察到相位延迟并非会随相位水平值线性变化，图 4-4(b)给出了伽马校正后调制相位值随灰度值线性变化曲线，两幅图对比效果相当明显，可以推断出伽马校正对调制器的工作时精确度发挥了重要作用。

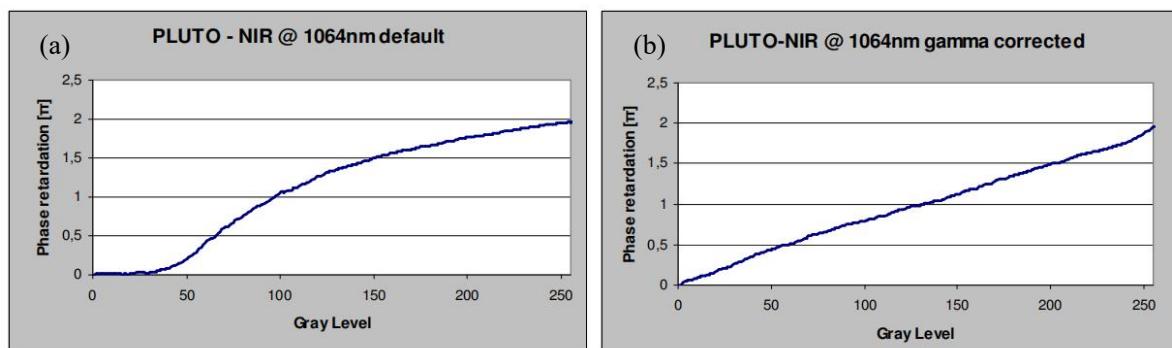


图 4-4 调制相位值随调制灰度变化曲线(a)应用伽马校正前; (b)应用伽马校正后

4.1.3 硅基液晶空间光调制器调制衍射效率及响应时间

对于硅基液晶空间光调制器，调制衍射效率为其重要的性能参数，衍射效率与硅基液晶器件的开口率、相位深度、回程区域等因素密切相关。LCoS 本身的晶格结构导致了高阶的衍射同时也影响衍射效率，为了得到空间光调制的准确衍射效率，我们选

取一个斑点图如 4-5(a)所示，在空间光调制器上加载其纯相位傅里叶变换全息图如图 4-5(b)所示，通过计算全息光学再现手段，其在光信号入射到空间光调制器上后，在后焦面上形成光学再现图像，结果应为镂空圆形斑点图案。若百分百的信号光被调制器的 LCoS 调制，则根据设计的图案，再现图像中心光强为接近零。然而由于调制器的调制效率有限，在实际结果中入射平面波经 SLM 反射后，再现像如图 4-5(c)所示，中心斑点处即为未受调制光信号光功率，经光功率计测得此处光功率为 $16.1 \mu\text{W}$ ，整体光功率包括调制信号和未调制信号共 $132.5 \mu\text{W}$ ，最终计算得空间光调制器调制效率为 $(132.5 \mu\text{W} - 16.1 \mu\text{W}) / 132.5 \mu\text{W} \approx 87.8\%$ 。

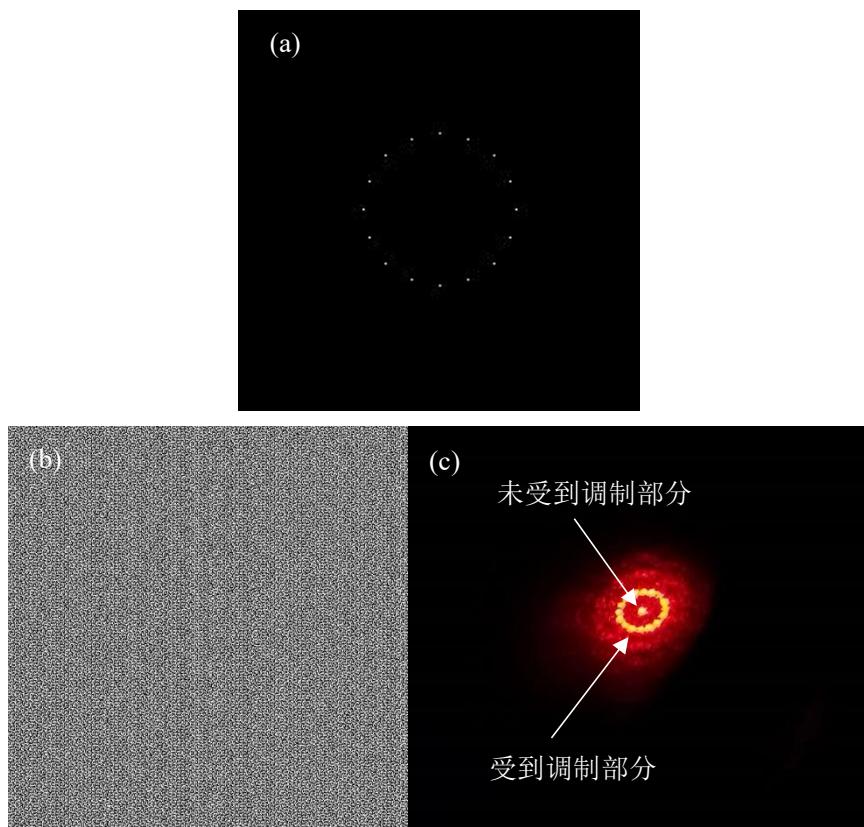


图 4-5 (a)加载图案; (b)加载图案纯相位傅里叶变换全息图;
(c)调制器反射光情况

响应时间是可以衡量一个器件的响应速度的参数，包括上升时间和下降时间，对此类型硅基液晶空间光调制器而言，响应时间指的是液晶相位深度从 0 到 2π 以及从 2π 到 0 时的时间长度。图 4-6 给出了用示波器测得的空间光调制器调制光信号转换为电信号后的信号变化情况，图中 t_1 到 t_2 的时间差为一张加载的 Hadamard 基底图转换为全黑图的过程时间， $\Delta t = 48 \text{ ms}$ 。并且从图中可以观察到在 t_1 时刻之前加载基底图时信号波动是比较剧烈的，这主要是相位闪烁和暗噪声因素导致，为了防止这种噪声影

响系统实验结果，信号采集过程中需要采集大量信号点数，这个数值在程序设计中设置是每幅 Hadamard 基底图 18000 个采样点，采样速率可达到每秒 50000 个采样点采集。

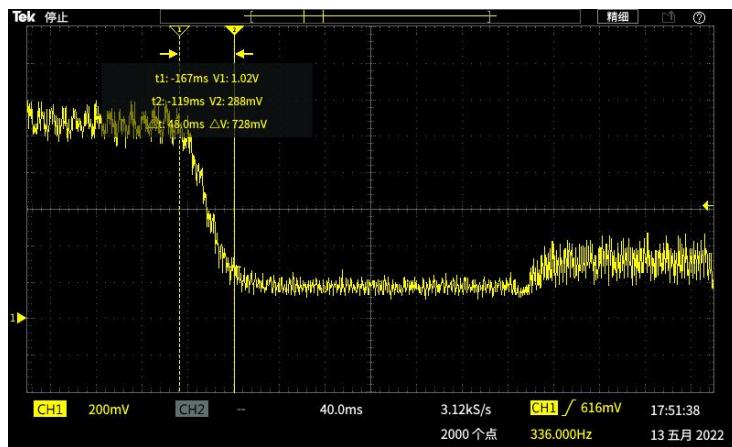


图 4-6 示波器通过光纤测得的相位调制信号变化情况

4.1.4 激光源、探测器、采集卡选取

根据要实现系统的特性，本系统需要一个稳定输出单一光波长的激光器作为成像光源使用，于是采用了成本较低输出稳定的氦氖激光器。氦氖激光器在可见光区和红外光区可产生多种波长的激光谱线，其中 99.8%以上的是 0.6328 μm 的红光，有非常好的方向性和相干性。

系统实现所用到的光电探测器是 THORLABS 厂家的 PDAPC2，它所能探测到的波长范围可达 320 nm-1100 nm，覆盖氦氖激光器发射激光波长，且其噪声低，带宽可达 11 MHz，工作区域达到 100 mm² (10 mm × 10 mm)。系统还用到了数据采集板(Data Acquisition Board ,DAQ USB-205)，进行测量计算。此型号采集卡拥有 12 位分辨率，采样率达 500 kS/s，可与 PDAPC2 光电探测器配套使用。

4.1.5 玻璃刻蚀物体定制

需要介绍还有定制的相位物体，实验系统成像用到相位成像物体是采用玻璃刻蚀技术制作的，制作的材料是 JGS2 石英玻璃。对于 JGS2 玻璃材料，其在氦氖激光 632.8 nm 波长下的折射率为 1.45702，根据相位差公式

$$\delta\phi = 2\pi(n-1)h / \lambda \quad (4.3)$$

式中 h 为刻蚀深度， n 为折射率， λ 表示光波长。用 AutoCAD 软件设计出了相位差接近 $\pi/2$ 的刻蚀物体。物体如图 4-7(a)所示，设计的图为河北大学的校徽，整体外轮廓圆

设计的半径大小约为 1.5 mm，图中红色部分深度刻蚀为 372 nm，绿色部分刻蚀深度为 715 nm，黄色部分刻蚀深度为 1051 nm，分别用以对应 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ 的相位差。根据(4.3)公式计算，相位差真正为 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ 时的刻蚀深度与实际物体刻蚀深度存在有一定误差，实际刻蚀物体在 632.8 nm 波长下复透过率由图 4-7(b)所示，在图中可以看出红色部分对应的其实是 0.53π 的相位差，绿色部分对应的实际为 1.03π 的相位差，蓝色部分对应的实际为 1.52π 的相位差。故虽不同深度之间的相位差与理论值有出入，但相互之间的相位差恒定约为 $\pi/2$ 。

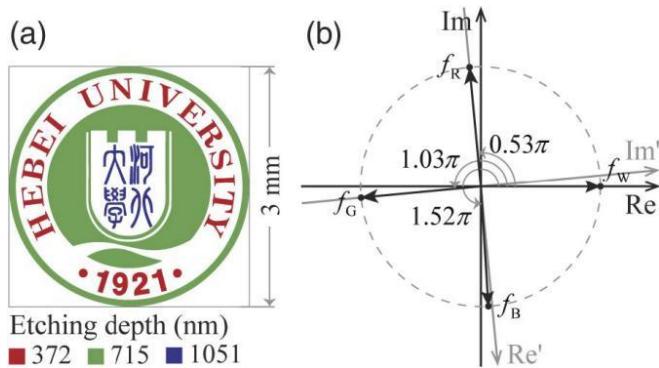
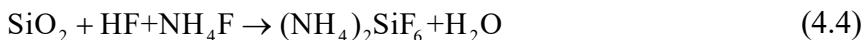


图 4-7 (a)用 AutoCAD 软件设计的河北大学校徽相位物体 (b) 632.8 nm 波长光的复透
过率值

之所以理论刻蚀深度和实际物体刻蚀深度存在误差，是由于此过程是采用的化学刻蚀技术，刻蚀深度是人为通过时间掌控，它的机理是利用化学试液与石英玻璃进行化学反应，达到刻蚀目的。石英在化学试液(一般为 HF 与 NH₄F 缓冲液)中的化学反应方程为



反应过程包括



整个刻蚀的时间取决于腐蚀液的组成及温度。对于本文中用到定制的河北大学校徽相位物体，它有三个不同的相位刻蚀深度，整体主要分三步进行刻蚀，首先刻蚀最深的蓝色部分，这个过程需要将除蓝色部分外的其他所有表面涂上防蚀层，将玻璃材料放入化学试液，经过一段时间之后，化学试液只与蓝色部分发生反应，有了一定刻蚀效果(这个刻蚀效果约为 $\pi/2$ 个相位深度)后将玻璃取出，第一步至此完成。第二步需要将

图中绿色要刻蚀的部分防蚀层去除，而后继续将玻璃材料放入化学试液，这个过程化学试液会与蓝色和绿色部分发生反应，对这两部分进行化学刻蚀，又经过同样的时间，刻蚀深度仍然是 $\pi/2$ 个相位深度，将玻璃取出，第二步完成。最后一步是去除红色部分防蚀层再将玻璃材料放入化学试液，最后仍然经过相同的时间，使得校徽物体红色部分刻蚀 $\pi/2$ 个相位深度后，材料会制作完成。刻蚀完成的材料蓝色部分刻蚀的效果对应 $3\pi/2$ 相位深度，绿色部分刻蚀的效果对应 π 相位深度，红色部分刻蚀的效果对应 $\pi/2$ 相位深度，其余白色部分对应0相位深度。

4.2 系统实现

4.2.1 系统光路实现

Hadamard 基矩阵是一种纯相位矩阵，在相干照明下通过相位调制可以直接得到相应的结构模式，因此，本章节实现的 CSPI 方案仍采用了 Hadamard 基扫描。系统装置中的光信号被空间光调制器调制后，光路经过了一个 $4f$ 系统，当输入两束相干的偏振光时， $4f$ 系统可以连续地改变两束光的衍射级数的相位差，达到衍射光强相加减的目的。经过 $4f$ 系统的变换，使得系统可以物理实现对光信息频谱分析和在频域处理，同时可以消除系统中存在的二次相位因子，加在系统中十分必要。根据系统搭建的光路这里选取了焦距为 30 cm，孔径为 50 mm 的两个消色差双透镜组成 $4f$ 系统。

系统装置图如图 4-8 所示，氦氖激光器发出 632.8 nm 波长激光，后续会经过一个半波片(Half Wave Plate, HWP)将激光滤为线偏振光，这一步主要是为后续形成相干照明做条件。而此时激光还是一束方向性较好的准直光，后续到空间光调制器上需要扩束准直系统(Spatial Filter System, SFS)进行扩束，但经过扩束器后的光路便不再是平行光，再然后通过一个凸透镜 L_0 将后续光路调整为更加均匀的平行光入射到分光棱镜上。入射到分光棱镜上的激光分成了两束，一束直接作为参考光到了 $4f$ 系统一路，另一束穿过棱镜入射到纯相位 SLM 的 LCoS 微显示面板上。LCoS 面板的分辨率为 1920×1080 像素，像素间距为 8 μm。LCoS 面板根据计算机生成的显示图像，对反射光的相位进行调制，生成相应的结构光，实际上 LCoS 只具有不足 90% 的调制效率，反射光中仍有一些未受到调制的光可作为参考光反射回分光棱镜。经分束棱镜到 $4f$ 系统的结构光与参考光沿同一路径，产生共路干涉，形成相干结构照明。接下来经过的 L_1 和 L_2 是 $4f$ 系统的两个透镜， $4f$ 系统可以将 LCoS 产生的相干结构照明成像到目标物体上，

而过滤去不需要的二次相位因子，经过 $4f$ 系统的光会通过物体最后经收集透镜 L_3 到达单像素探测器(SPD) ，这里收集的是光的零频分量，其中会加一个针孔(pinhole filter，

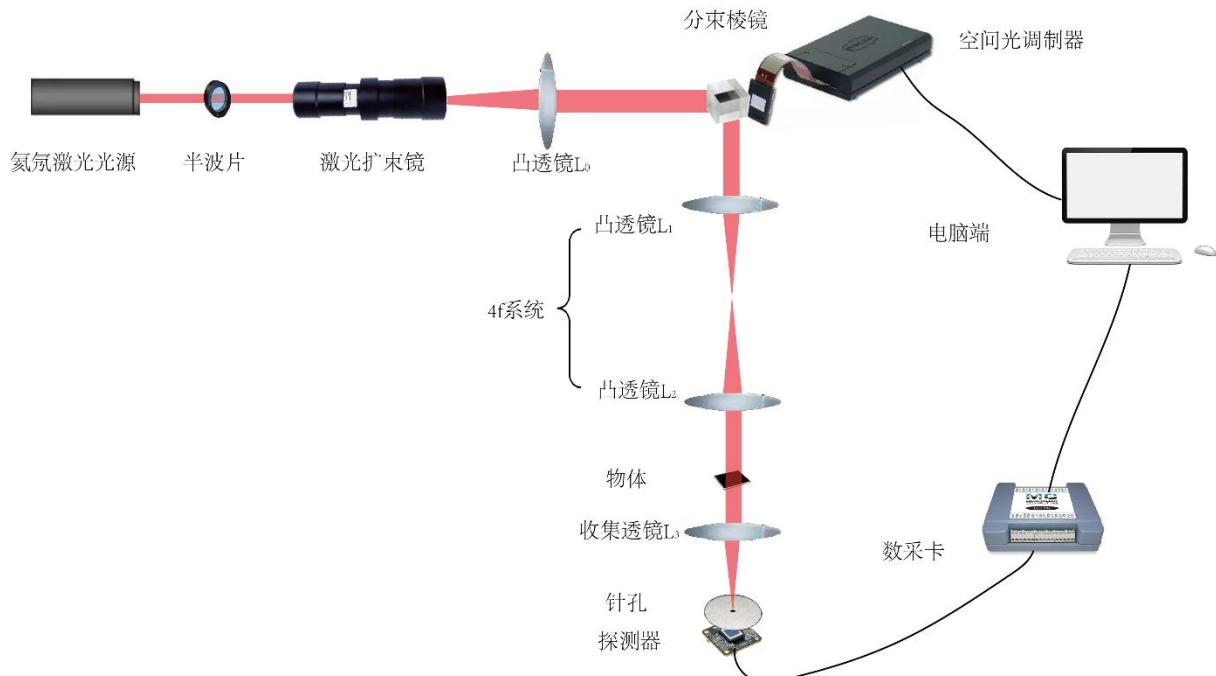


图 4-8 相干结构照明的复振幅单像素成像系统装置图



图 4-9 相干结构照明的复振幅单像素成像系统装置实拍图

PH)来过滤非零频光分量。SPD 作为单像素探测器收集来自针孔的零频光，光探测器的输出结果通过数据采集板(DAQ)测量计算提供给电脑端，系统装置搭建好后的实拍图如图 4-9 所示。

4.2.2 系统软件部分实现

本系统软件部分由 Python 语言设计，整体流程框图如图 4-10 所示，设置参数包括像素值 N(实验中用到的是 64 像素)，切换图像延迟时间设置为 100 ms，延迟主要是为了降低空间光调制器相位闪烁带来的噪声影响，采集卡的采样点数为 18000 等参数。程序初始化会获取调制器显示屏幕大小进而投影合适比例图案，包括初始化测量数据，分配系统空间用于采集数据等功能。生成 Hadamard 基底图案采用了四步相移技术，若测量过程有影响系统运行因素发生如外部环境改变或参数设置错误，整个程序运行过程还可通过按下 Esc 键结束。

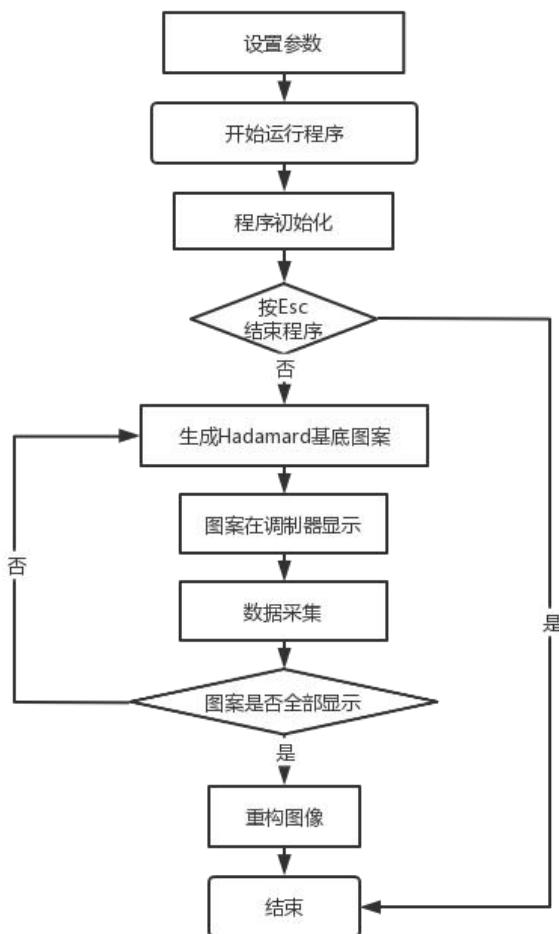


图 4-10 系统软件部分流程框图

数据采集到图像重构的过程中 18000 个采样点会取平均值，最终每张基底图得到一个数据，共采集 $64 \times 64 \times 4 = 16384$ 个数据。图 4-10 给出了一张 Hadamard 基底图会四步相移出的四类图相移矩阵，原图相移 0 相位记为 $\mathbf{P}^{(0)}$ ，相移 $\pi/2$ 相位记为 $\mathbf{P}^{(\pi/2)}$ ，相移 π 相位记为 $\mathbf{P}^{(\pi)}$ 相移 $3\pi/2$ 相位记为 $\mathbf{P}^{(3\pi/2)}$ ，并且图中给出了采集的前四个数据分别记为 $D_0^{(0)}$ 、 $D_0^{(\pi/2)}$ 、 $D_0^{(\pi)}$ 、 $D_0^{(3\pi/2)}$ 以此举例第一张 Hadamard 图调制实部频谱可由 $D_0^{(\pi)} - D_0^{(0)}$ 得到，虚部频谱可由 $D_0^{(3\pi/2)} - D_0^{(\pi/2)}$ 得到，加载所有的 Hadamard 基底图案就会得到所有的频谱分量，得到整个频谱图，四个 64 行 64 列的频谱矩阵(4.7)

$$\begin{aligned}\mathbf{D}_0 &= \begin{pmatrix} D_0^{(0)} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \\ \cdot & & \cdot & \\ \cdot & & & \cdot \end{pmatrix} & \mathbf{D}_\pi &= \begin{pmatrix} D_0^{(\pi)} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \\ \cdot & & \cdot & \\ \cdot & & & \cdot \end{pmatrix} \\ \mathbf{D}_{\pi/2} &= \begin{pmatrix} D_0^{(\pi/2)} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \\ \cdot & & \cdot & \\ \cdot & & & \cdot \end{pmatrix} & \mathbf{D}_{3\pi/2} &= \begin{pmatrix} D_0^{(3\pi/2)} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \\ \cdot & & \cdot & \\ \cdot & & & \cdot \end{pmatrix}\end{aligned}\quad (4.7)$$

得到目标物体的 Hadamard 谱矩阵后根据式(4.8)和(4.9)对 Hadamard 频谱进行逆变换，可以重构目标物体的复透过率

$$\mathbf{F} = \alpha e^{-j\Delta\phi} \left\{ [\mathbf{D}^{(0)} - \mathbf{D}^{(\pi)}] + j[\mathbf{D}^{(3\pi/2)} - \mathbf{D}^{(\pi/2)}] \right\} \quad (4.8)$$

$$\mathbf{f} = \frac{1}{N^2} \mathbf{H} \mathbf{F} \mathbf{H} \quad (4.9)$$

式(4.7)中 $\alpha = 1 / [4\eta\sqrt{I_0 I_r} |F(0,0)|]$ 。

4.3 系统测试

图 4-11(a)为系统对设计的相位物体，图 4-11(b)为河北大学校徽做的成像结果。图中图像重构像素为 128 像素，系统运行是每幅图探测用时采样点除以采样速率有 $18000/50000 = 0.36$ s，在空间光调制器上每幅图从图案加载到显示稳定约耗时 0.1 s，而一共投影 128 像素共 $128 \times 128 \times 4 = 65536$ 张图，这个过程中每张图的切换还设置有延迟时间来降低调制器相位闪烁带来的影响，一次连续完成总体运行时间有 660 分钟，相较于双路干涉单像素成像系统光路，运行更加稳定。

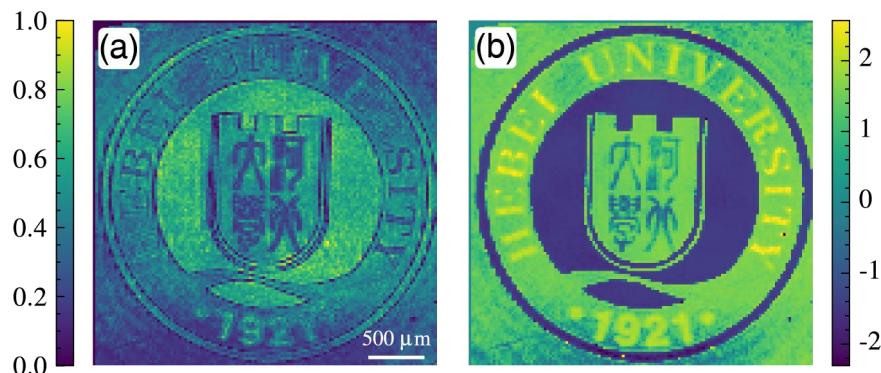


图 4-11 (a)振幅结果图像; (b)相位结果图像

系统的分辨率是由数字变焦和光学变焦共同决定，两种变焦方法的结合可使 CSPI 具有高空间分辨率和高成像质量。

4.4 本章小结

本章实现了一个高效的复振幅单像素成像系统，介绍了 LCoS 硅基液晶空间光调制器的工作原理，同时采用 Hadamard 基扫描技术实现系统高质量成像。在此系统方案中，采用纯相位 LCoS-SLM 对准直激光束进行复振幅调制，同时用到零频探测和四步相移技术，使用单像素光电探测器检测目标光的零频分量，获得目标光的幅值频谱，利用 Hadamard 逆变换进一步提取所需的复振幅图像。对相位深度蚀刻玻璃实验图像表明，此系统在简单稳定的实验配置下保持了高效率、高成像质量、高空间分辨率的特点。

第五章 基于树莓派的单像素成像系统

本章节给出了一种实现成本低廉，结构装置简单的单像素成像系统——基于树莓派的单像素成像系统。本章采用日常生活中常见投影仪做投影单元，对目标物体进行基底图投影，基于树莓派的彩色单像素成像系统升级了光强探测器，在系统装置上做了改进，在保证成像质量的前提下，实现了彩色图像重构，此系统的设计更易于推广单像素成像技术。

5.1 基于树莓派的单像素成像系统装置选取

5.1.1 系统硬件选取

本系统的核心器件是树莓派(4B)图 5-1(a)，操控系统的运行。树莓派是为普及计算机编程教育而设计的基于 ARM 架构的微型电脑，其体积小、价格低、接口丰富、性能强大，随着时代发展新款树莓派性能越来越好，可以实现编辑文档、浏览网页、玩游戏、播放视频、音频等，还可以利用树莓派制作智能小车、示波器、电子相框、家庭影院、相机等被广泛应用于机器人、智能家居控制、物联网等领域，并且尤其适用于大学生创新实验场合。树莓派的操作系统 Raspberry Pi OS 是基于 Linux 的操作系统，且完全开源，功能完备，集成了 4 核的 Arm Cortex-A72 处理器，主频为 1.5 GHz，最重要的是预置了 Python 的开发环境，这就保证了系统可使用 Python 环境来设计系统的软件部分。

树莓派(4B) 在处理器速度，多媒体，内存和连接方面的性能尤为突出，它拥有 40 个扩展接口其功能如图 5-1(b) ，主要分为 5V、3.3V、接地以及通用 GPIO 口，其中通用的 GPIO 口大多又可以复用为其他外设使用，它还可以插 HAT 板，可以选取配套的采集卡插在 GPIO 接口上。除此之外树莓派还拥有高性能 64 位四核处理器，通过一对 micro-HDMI 端口支持分辨率高达 4K 的双显示屏，高达 4Kp60 的硬件视频解码，高达 4 GB 的 RAM，双频 2.4/5.0 GHz 无线局域网，蓝牙 5.0，千兆以太网，USB 3.0 和 PoE 功能。本文提出在实验教学中利用树莓派代替传统计算机实现单像素成像系统，如果推广到大学生物理实验，将非常有利于锻炼学生的动手能力，培养其创新思维。

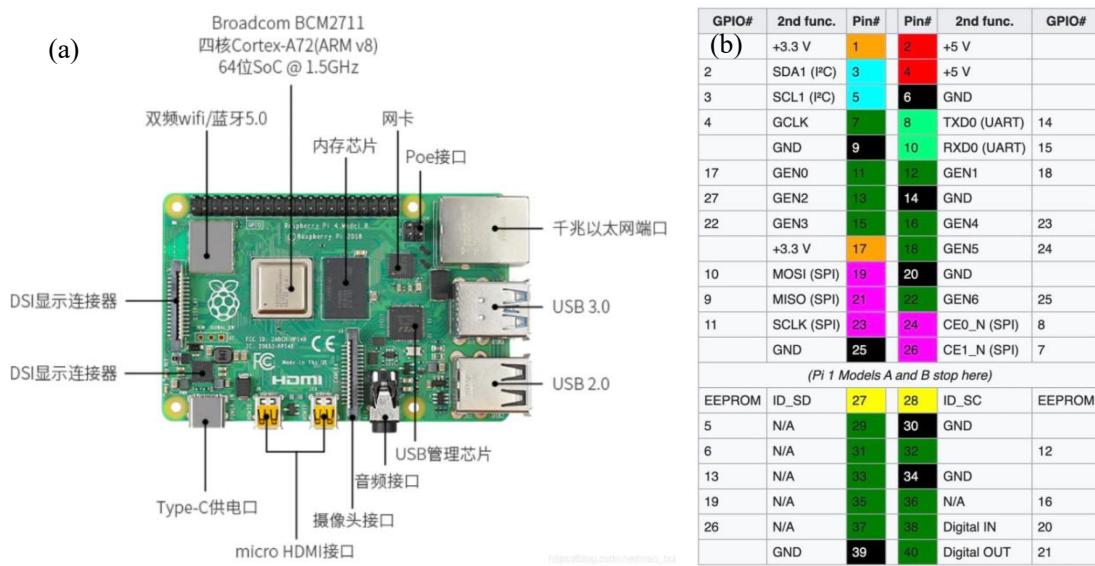


图 5-1 (a)树莓派(4B); (b)树莓派 40 个扩展接口

市面上常见的投影仪很多，我们最终是以米家激光投影仪(L185JCN)图 5-2(a)做系统的投影单元。其工作原理图如图 5-2(b)所示，它属于激光投影仪的一种，利用激光光束来投射出画面。光学部件主要包括三色激光光源（Laser Light Source, LLS）以及红、绿和蓝光阀、合束 X 棱镜、投影镜头和驱动光阀等部分。它以红、绿、蓝三色激光光源作为三原色，并通过一定的比例进行混色合成等能白光，最终投射出投影。本系统的实现即利用激光投影仪作为非相干光源散斑光场的调制器，将散斑图投射到距离投影仪一定距离的待测物体上，反射光信号经单像素光电探测器收集，实现单像素成像的图像重构。此类型激光投影仪色域宽，分辨率高，饱和度大，图像质量好，通过使用激光投影仪即可完成 Hadamard 图案投影过程，不仅可以实现灰度图的重构，而且完全可以利用此型号投影仪实现彩色单像素成像系统，操作简单，易于获得。

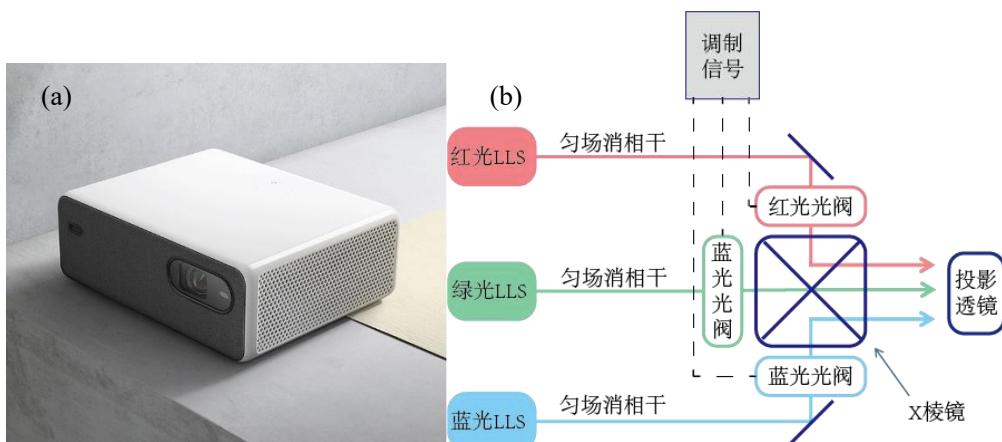


图 5-2 (a)激光投影仪; (b)激光投影仪工作原理图

系统的采集模块是由一个采集卡(MCC-118 数采卡)图 5-3 进行数据采集，树莓派作为一个简单易用功能强大的计算平台，很好地支持 Python，而且刚好有 MCC 118 数据采集模块可以直接扩展出数据采集功能，它可以进行 12 位，8 通道高速数据采集，最大采集速率为 100KS/s，最大输入量程为±10V 可以进行单电压点和电压波形采集。

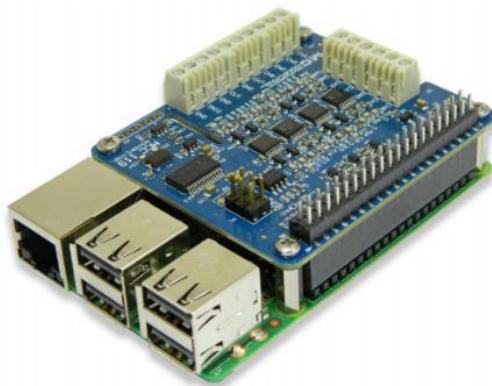
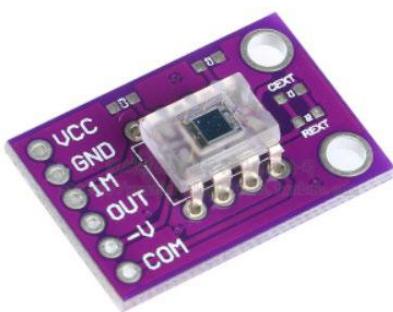


图 5-3 MCC-118 数据采集卡

本系统搭建的原则是低成本，所以探测器部分需要适配十分具有性价比的光强探测器。OPT101 是一款集成的光强传感模块，如图 5-4 所示，内部集成有高性能的光电二极管，其输出电压随光照强度线性增大。引脚功能中 VCC 引脚直接连到树莓派上 GPIO 接口的+5V 上；GND、-V 和 COM 引脚连接到 GPIO 接口的 GND 上；1M 和 OUT 接口连接到一起作为传感器的电压输出接口。



引脚	功能
VCC	供电正极 (2.7-36V)
GND	接地
1M	输出端（连接到内部反馈网络）
OUT	输出端
-V	接地（供电负极）
COM	接地（内部光电二极管阳极）

图 5-4 OPT101 光强传感器及引脚功能

5.1.2 滤波电路设计

滤波模块采用 RC 滤波电路构成的低通滤波器，一阶 RC 电路组成如图 5-5 所示。

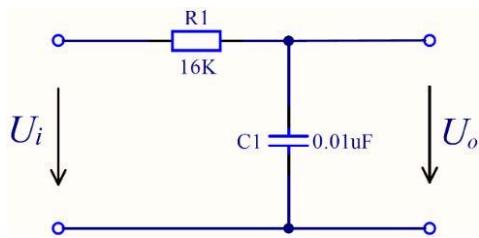


图 5-5 一阶 RC 电路

其输出电压 U_o 为

$$U_o = U_i \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + R} = U_i \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (5.1)$$

截止频率 f_o 为

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC} \quad (5.2)$$

电容电阻的选用可通过计算得到，现有的电阻为 $R = 16 \text{ K}\Omega$ ，电容为 $C = 0.01 \mu\text{F}$ ，将其代入上式(5.2)得 $f_o \approx 994.72 \text{ Hz}$ 。于是采用五阶 RC 电路如图 5-6 所示作为系统滤波电路。

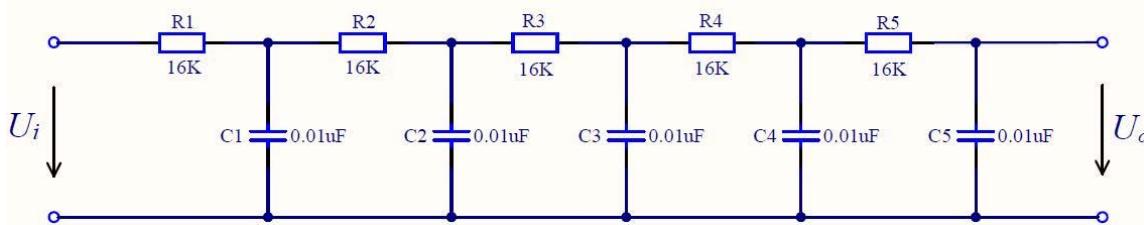


图 5-6 五阶 RC 滤波电路

五阶 RC 电路输出电压为

$$U_o = U_i \left(\frac{1}{1 + j\omega RC} \right)^5 \quad (5.3)$$

等效截止频率为

$$f_o \approx 0.3856 \times \frac{1}{2\pi RC} \approx 383.56 \text{ Hz} \quad (5.4)$$

将此电路通过面包板实现出分接入采集卡与探测器即可过滤掉 383.56Hz 以上的高频噪声，显著提高结果成像质量。

5.1.3 系统模块集成及软件设计

基于树莓派单像素成像系统装置选取好系统装置并实现好设计电路后，以图 5-7 的模块运行。树莓派作为核心，利用 Python 程序构建出 Hadamard 基底图传输到投影仪上，投影仪将基底图案投影到成像目标物体，物体对投射到上面的光进行反射，反射光进入到光强传感器，得到的光强数据通过设计的滤波模块电路传输到数据采集卡，数据采集卡的数据经过模数转换最后传回树莓派进行积分、Hadamard 逆变换、重构图像等操作。

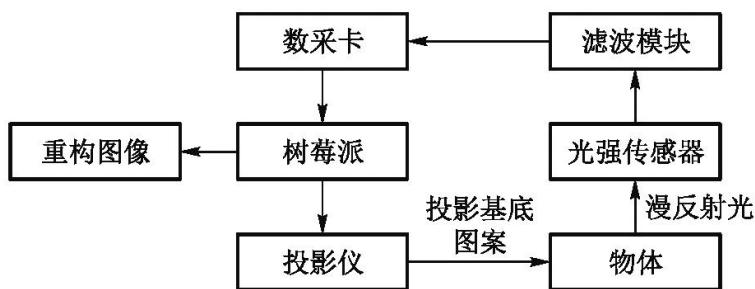


图 5-7 系统装置运行流程图

程序完成基底图案生成与显示，数据采集，图像重构等操作。程序流程如图 5-8 所示，整个系统通过程序运行开始，第一步自动完成初始化状态，初始化完成后根据设置好的像素值大小生成相应 Hadamard 基底图案，然后每生成一幅图投影仪会进行一次播放，数据采集模块会根据投影仪播放图像的频率，每次播放图案后采集一次数据，图案投影和数据采样时会设置一个延迟时间，这个时间是为过渡树莓派在计算采样点求平均的过程，直到播放完最后一张图并采集结束。程序会将整个过程收集到的数据以文本文件的格式保存在树莓派的特定文件路径下，同时程序会对保存下来的数据进行 Hadamard 差分和逆变换等操作进而重构图像，程序运行过程中可按下 Esc 键停止运行。

系统延迟时间是决定系统整个成像用时的重要因素，在实验时播放一张基底图案延迟 100 ms，这个时间内只有数据采集模块工作，采集数据，读取采样值，并求平均。设定的数据采集卡采样间隔为 0.0001 s，每张图片采集 400 个光强样本点，400 个样本点求平均的结果会作为该幅基底图案照明时的漫反射物光强度。

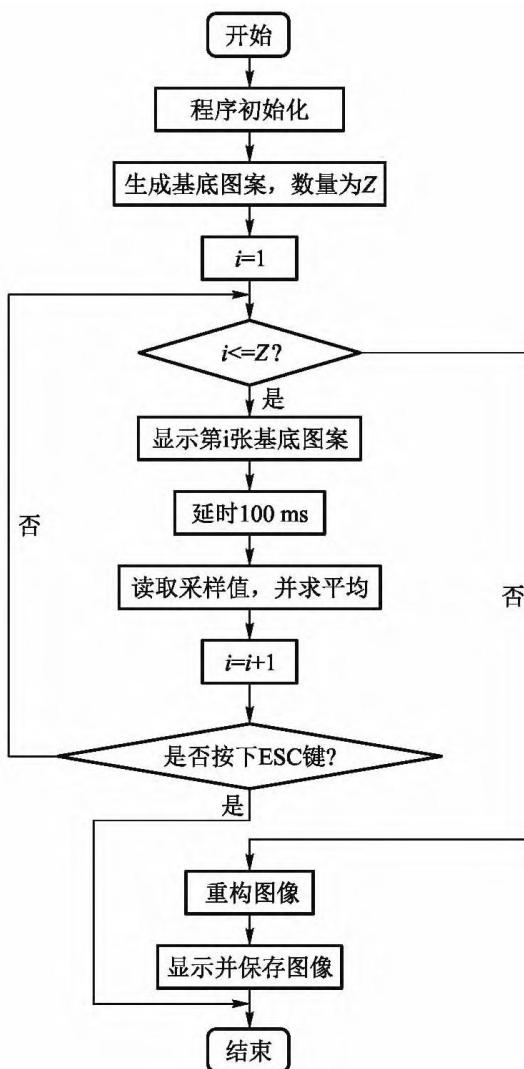


图 5-8 程序流程框图

5.2 基于树莓派的单像素成像系统实现

按照上述的系统设计方案，开发了图 5-9 所示的实验装置，图 5-10 为主要装置实拍图。系统的核心是控制单元，由树莓派(4B)构成。树莓派用于生成基底图案、控制投影、数据采集和数据处理。图像投影单元由米家激光投影仪构成，将树莓派发送来的基底图案投影到物体上，数据采集模块由光电探测电路及数据采集卡构成。探测器探测到信号传输到数据采集卡进行模数转换，树莓派通过 Python 程序将数据采集卡转换后数据进行图像重构。

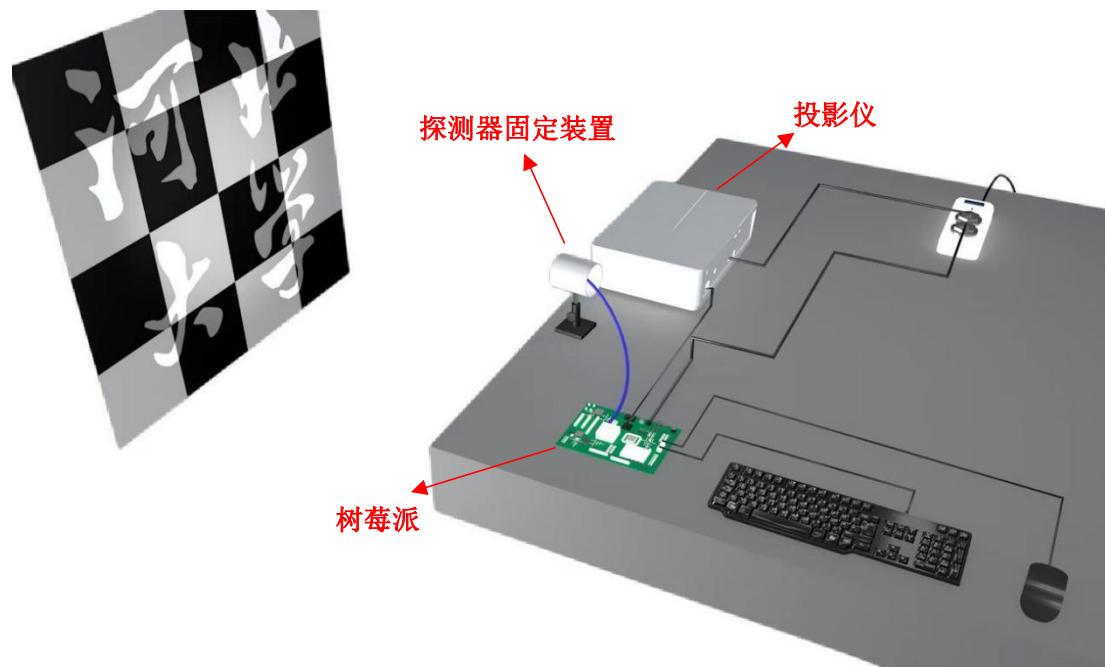


图 5-9 基于树莓派单像素成像系统装置图

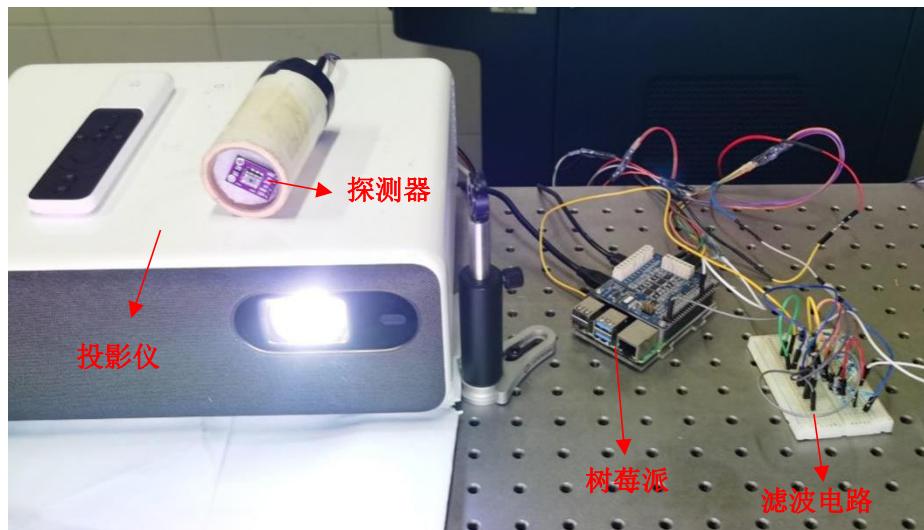


图 5-10 装置实拍图

实验将“河北大学”字样制作成剪纸置于黑色幕布上作为成像物体，得益于 A4 纸对光较好的漫反射效果，字样采用 A4 纸剪切制作，背景采用具有良好吸光特性的黑色幕布，长宽均为 0.6 m，如图 5-11 所示。



图 5-11 “河北大学”字样成像物体

5.3 基于树莓派的单像素成像系统测试

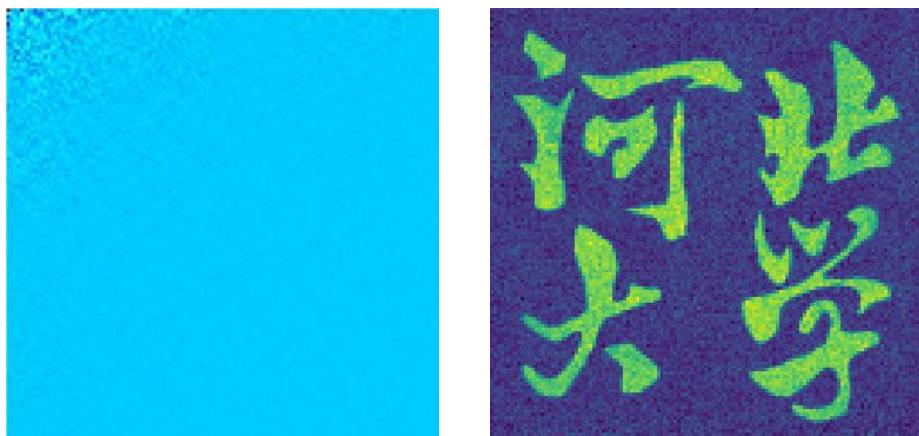


图 5-12 (a) Hadamard 频谱; (b)成像结果

投影仪逐一投影 $128 \times 128 \times 2$ 张 Hadamard 基底图案，利用(2.13)式对测量数据进行差分处理即可得到物体的 Hadamard 频谱，如图 5-12(a)所示。对测得哈达玛频谱矩阵再按(2.2)式进行逆变换，即重构出物体的像，如图 5-12(b)所示，所用时间为 100 分钟左右，这个时间包括设置的延迟时间，图像切换后稳定下来后的采集时间以及树莓派在重构图像时计算消耗的 Hadamard 基底图案生成时间。投影过程中为了便于投影，按最近邻域法将图像放大到 1024×1024 像素再加载到投影仪上显示，然后调整投影仪与物体的距离，直到幕布上的基底图案刚好完整覆盖物体。

5.4 基于树莓派的彩色单像素成像系统

5.4.1 三通道彩色探测模块

为了丰富系统功能，完成树莓派的彩色单像素成像系统的实现，这里将光电探测器重新做了选择。光电转换器件有多种分类并各有特点，主要分为光电二极管、雪崩二极管以及前两章中用到光电倍增管等。光电二极管利用内光电效应放大微弱光信号为光电流信号，其体积小、灵敏度高、响应速度快；雪崩二极管利用雪崩倍增效应放大微弱光信号为光电流信号，但易受温度影响大，稳定性差。采集系统旨在便携化、集成化、微型化，同时能有效检测到投影目标物体反射回来的光信号，因此采用体积小、易驱动的光电二极管作为光电探测器。主要从光电二极管的等效噪声功率、响应波长等参数进行器件选择。

等效噪声功率是描述光电二极管能探测到最低的光功率，当散射光经光电二极管输出的有效光电压与光电二极管本身的噪声电压相同时，此时散射光的光功率即为等效噪声功率，一般用 NEP 表示，其计算式为式(5.5)

$$NEP = \frac{EA}{\sqrt{\Delta f} S/N} \quad (5.5)$$

式中， E 为入射光能量， A 为光电二极管的接收面积， S/N 是信噪比， Δf 是噪声带宽。所示经由光功率计测得系统工作时探测器桶探测面光功率约为 $5.26 \mu\text{W}$ ，则探测器等效噪声功率需低于 μW 量级。

通过 RGB 三色合成来实现彩色的单像素成像系统，所用探测器的响应光波长需覆盖可见光波段。FDS100 型光电二极管(THORLABS)如图 5-13(a)所示，其响应波长为 $350\text{-}1100 \text{ nm}$ ，它随波长的响应变化曲线为图 5-13(b)，其等效噪声功率低于 $1.2 \times 10^{-14} \text{ W}$ ，光敏面积为 $3.6 \times 3.6 \text{ mm}^2$ ，售价低廉，可满足本系统搭建使用。

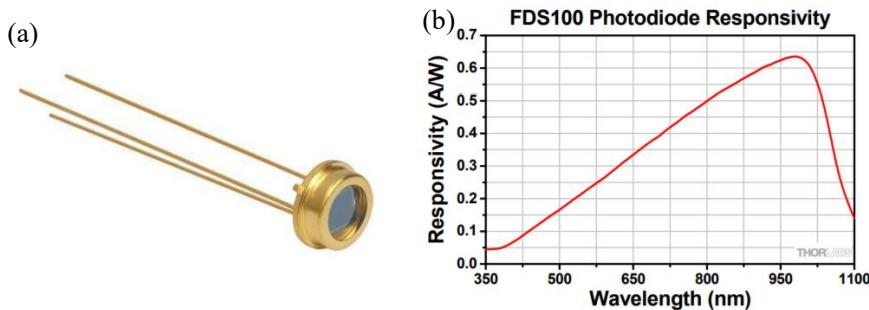


图 5-13 (a)FDS100 型光电二极管; (b) FDS100 随波长变化响应曲线

实现彩色成像系统还用到了的关键器件是的滤光片。本系统中用到的红绿蓝颜色(明基 W1050 色轮)图 5-14(a)滤光片需要分别贴合在三个光强探测器表面，将反射回来的光信号进行过滤，进而使得探测到三种不同颜色的光强信号，图 5-14(b)给出了波长透过率曲线图，可以看出三色滤光片在各自工作波长部分和白光谱线贴合得非常好，它们的透光率在相应波长部分透光率也能达到 90%以上，由此论断此种滤光片非常适合来对可彩色目标物体滤光。

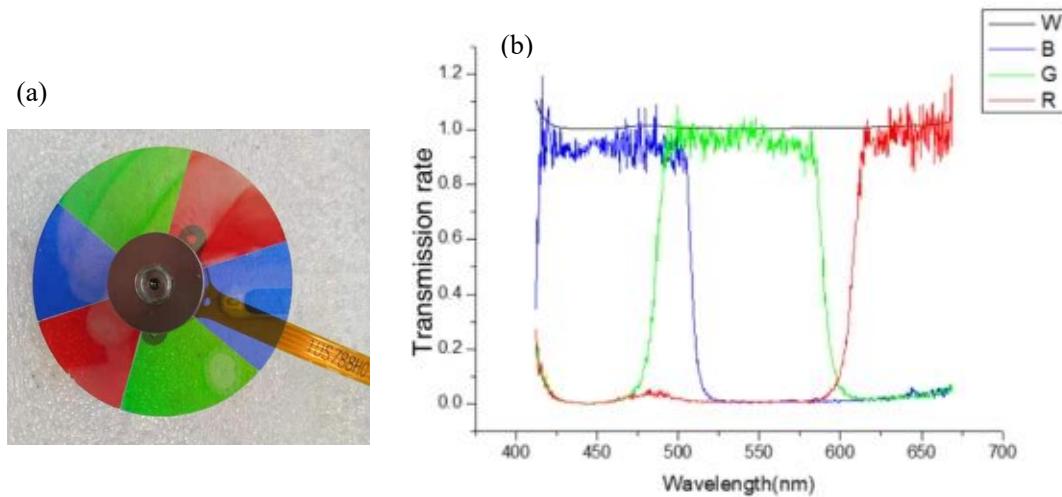


图 5-14 (a)明基 W1050 色轮; (b)波长透过率曲线图(W 白光、B 蓝光、G 绿光、R 红光)

基于树莓派的彩色单像素成像系统不同于使用 DMD 等器件，系统运作的过程很长，将滤光片粘贴到光强探测器上并实现稳定地探测对系统至关重要，于是为此设计了一个探测器桶来固定这一装置。图 5-15(a)探测器桶三维模型图及实拍图是为这部分用 3D 打印机做的一个桶探测器装置。通过这样的装置设计，不仅对装置的稳定性有了很大提高，而且降低了周围环境对探测的影响，图 5-15(b)为装置实拍图。

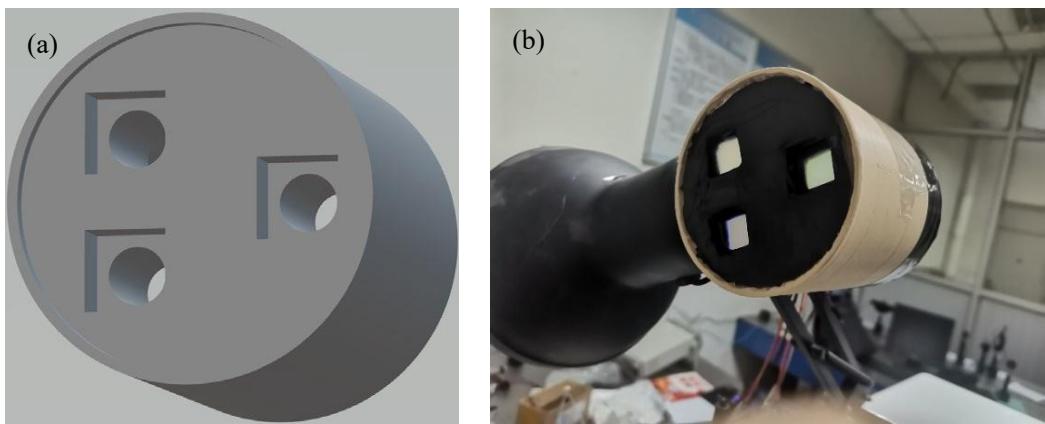


图 5-15 (a)探测器桶三维模型图; (b)成品实拍图

5.4.2 探测模块电路设计

在光电探测中光信号转变为电信号时，电信号参数常常会受到光电转换材料的相应敏感度、光电转换器件的输出特性等影响，因此这里对光电器件的输出信号进行了处理，使信号更加容易被观测、采集、调制。

运算电路中的集成运算应当工作在线性区，因而电路中必须引入负反馈，当集成运算放大器外加深度负反馈时，集成运算放大器工作在线性区，一个重要的应用是可以实现对模拟信号的运算。例如：比例运算、积分运算、微分运算等。

图 5-16 是专为系统设计的一个带有复位功能的光电积分电路。其中，U1 是运算放大器(LM358P)，U2 是光电二极管，U3 是双向模拟开关器(CD4066)，U4 是 NPN 型三极管(S9014)。

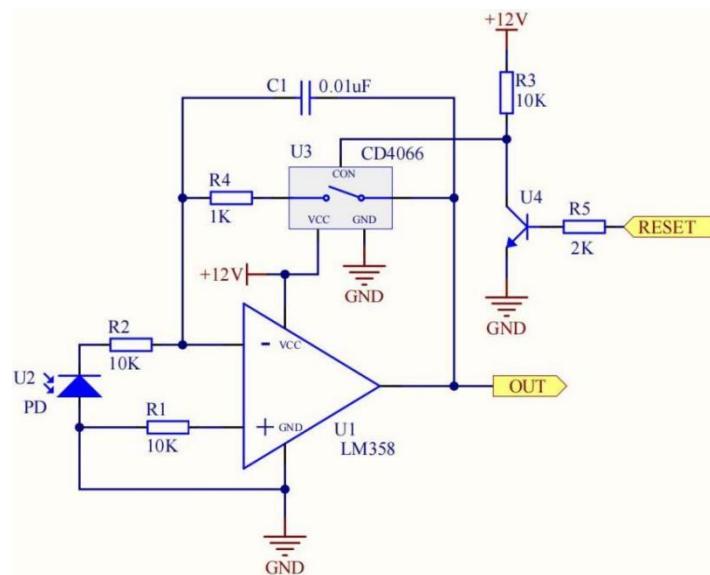


图 5-16 光电积分电路

光电二极管的正极连接到 GND，负极经过电阻值为 $10\text{ k}\Omega$ 的 R2 连接到 U1 的反相输入端，U1 的输出端通过电容 C1 连接到反相输入端，就构成一个积分电路。同时加入一个模拟开关器 U3，其控制端 CON 输入电压为低电平时，开关断开，电路处于积分状态；输入电压等于 VCC 时，开关闭合，电路处于复位状态。开关的闭合由复位信号 RESET 控制，经过一个三极管连接到控制端 CON。当 RESET 信号为高电平时，CON 端为低电平，开关断开为低电平时，CON 端为高电平，开关导通。在实验中，将方波信号作为 RESET 信号，使电路在每次投影基底图案后先进行复位，然后进行积分累积，最后采集数据。根据上述光电积分电路，绘制了探测模块的电路图，如图 5-17 所示，并根据此做了相应的印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)，PCB 板的设计及图及成品如图 5-18(a)所示。

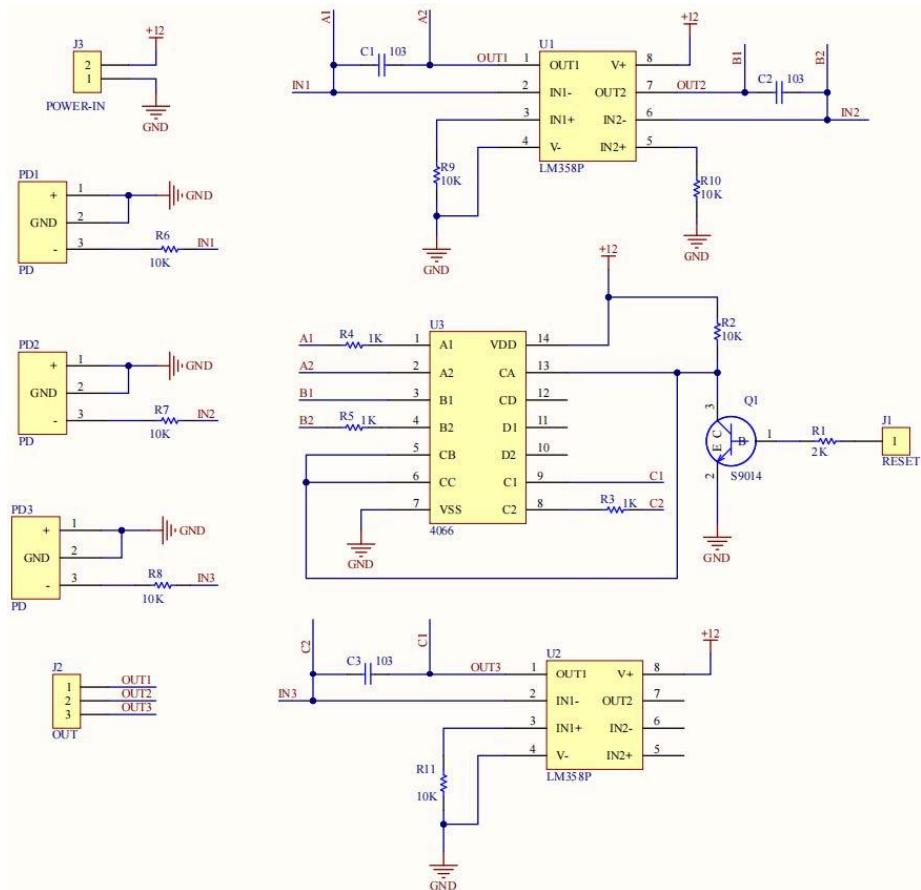


图 5-17 探测模块电路图

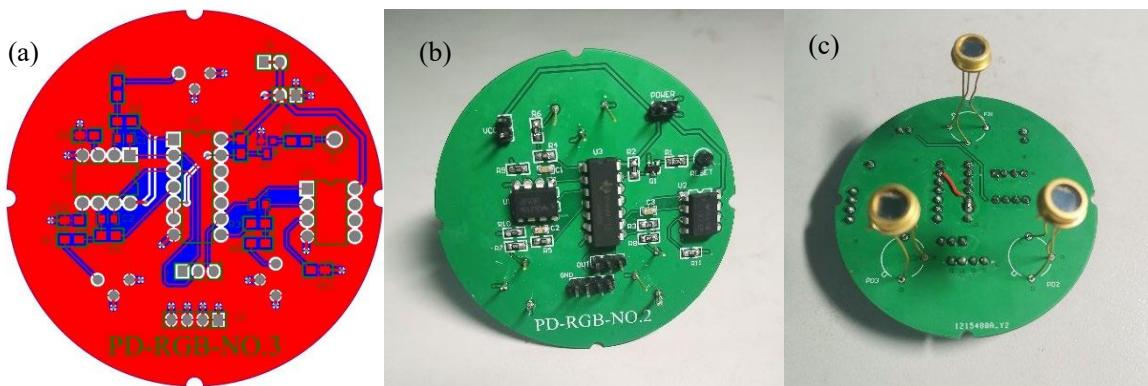


图 5-18 (a)PCB 板设计图; (b)实物正面图; (c)实物反面图

PCB 板的设计可完美适配探测器桶，整个板子是一个直径为 6 cm 的圆，为便于固定，上下左右分别设计四个孔。其中，元器件在正面，三个光电二极管放置在板子的背面，方便进行光强采集和连接线路。PCB 板打印出来后，焊接上相对应的元器件，经过测试无误后的探测器板如图 5-18(b)实物正面图和图 5-18(c)实物反面图，图 5-19 给出了 PCB 板与 3D 打印探测器桶组装示意图。

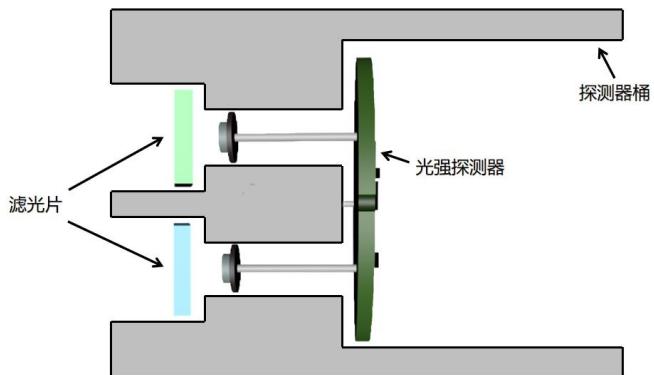


图 5-19 PCB 板与 3D 打印探测器桶组装示意图

5.4.3 系统模块集成

彩色成像系统后与原灰度成像系统相比，彩色成像系统采用了三个光电二极管器和积分电路，以及外加的滤光片。由于彩色单像素成像系统为三个通道同时采集，若仍用树莓派来进行数据积分会增大树莓派负担，这里用设计的积分电路进行数据积分，这样就将程序运行压力转移到硬件上，降低了树莓派任务量，提高了系统运行效率。

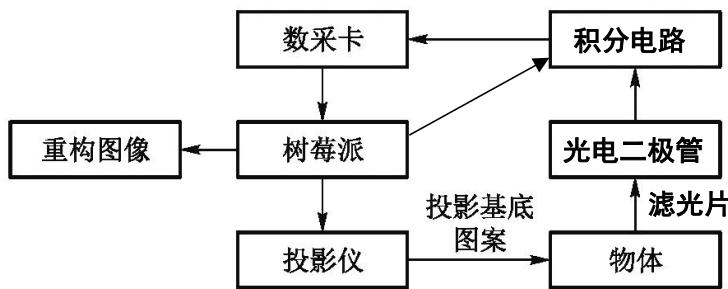


图 5-20 系统装置运行流程图

基于树莓派的彩色单像素成像系统软件设计部分主要增加了对于三种颜色光分量光强数据的合成处理。红绿蓝三色光通过颜色校正，数据归一化合成在一起形成彩色图像。图像的校正过程选取固定颜色强度作为基准，通过选取不同的校正点可调整最终合成出来的图像颜色。

5.5 基于树莓派彩色单像素成像系统实现

系统搭建后的装置图如图 5-21 所示，图 5-22 为系统实拍图。树莓派的 USB 接口连接键盘鼠标可直接控制树莓派，树莓派界面会由投影仪直接投影出来。系统中的电路部分是集成到探测器桶中的，由 PCB 板上的电路连接贴有三色滤光片的光强探测器直接进行信号过滤和放大，之后再连接数据采集卡进行数据采集，系统程序包括数据写入部分，当图案投影完成后，采集到的数据文件会自动保存，同时程序会将所得数据处理为图像。

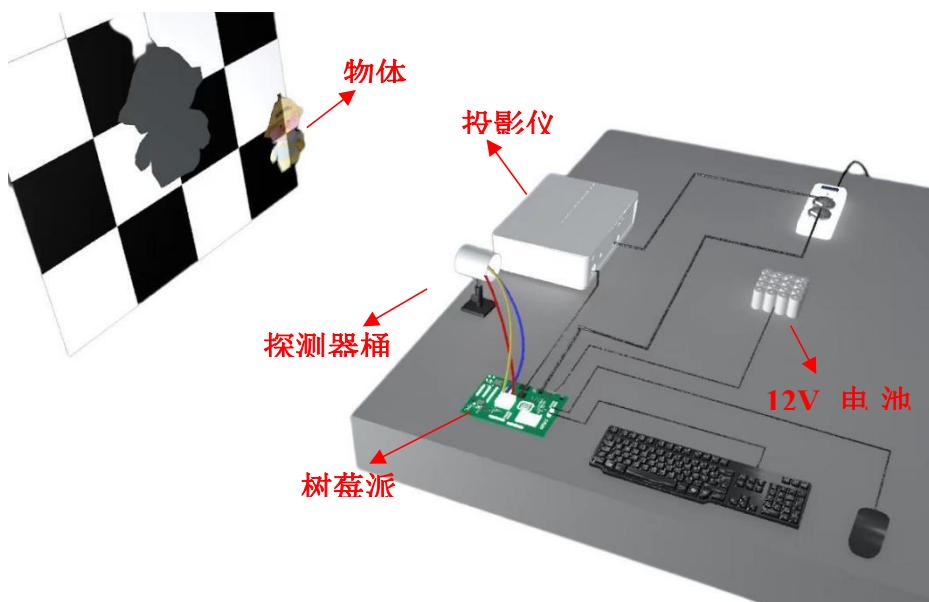


图 5-21 基于树莓派的彩色单像素成像装置图

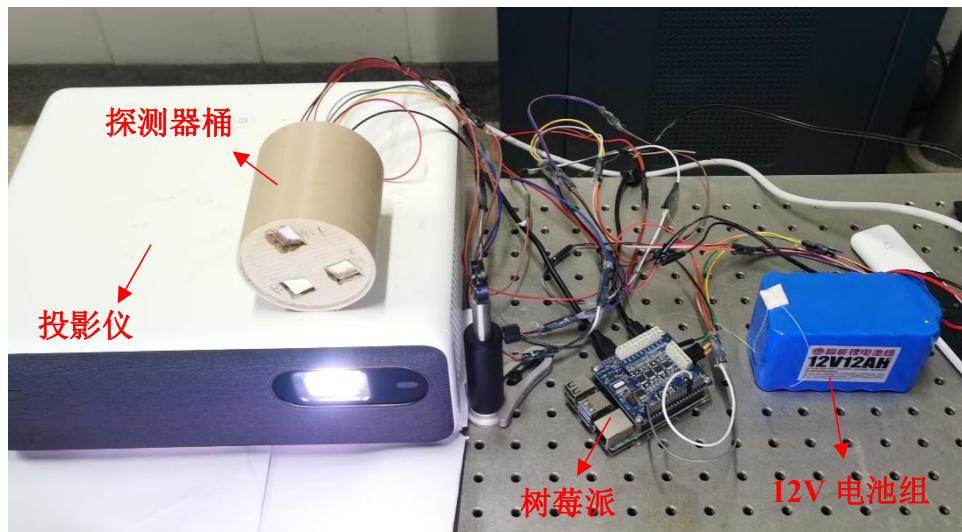


图 5-22 基于树莓派的彩色单像素成像装置实拍图

数据采集卡通过树莓派控制，利用 Python 程序对其进行初始化和配置参数。在实际实验过程中，采集卡设定的采集速率为 10 KS/s，并通过调整投影仪亮度将光强值控制在上限范围内(约 5 V)。

系统运行时的软件设计部分与基于树莓派的灰度成像单像素成像系统大同小异，两个系统采用了同样的 Hadamard 基底图案进行投影，在同样的参数设置下，利用了同样的数据采集和图像重构方法进行实验。不同的是在彩色成像过程中同时采集三个数据，但由于升级了光强探测器，系统探测效率有所提高，整体消耗的时间并未明显增加，最终得到的彩色图像为三个通道数据采集图像叠加而成。

5.6 基于树莓派的彩色单像素成像系统测试分析

彩色的树莓派的单像素成像系统，选取了一个玩偶图纸进行单像素图像重构。实验物体及结果图 5-23 所示，32 像素完成需要 8 分钟，64 像素完成需要半小时，128 像素完成需要两个小时。基于树莓派实现的彩色单像素成像系统虽然器件结构简单，但投影仪播放图案的速度慢，并且图像投影端投影仪切换图像后，图像再次稳定下来仍然需要数据采集多个采样点导致整个系统工作起来比较耗时。

基于树莓派彩色单像素成像系统还测试了立体的玩偶用基于树莓派的彩色单像素成像系统来做成像，成像时间和像素数不变的情况下有图 5-24 的测试结果。实验结果充分证明，运用此系统完全可以还原出原物体的固有颜色，在构图上可以实现高信噪比的细节还原。



图 5-23 玩偶图纸及其 32 像素、64 像素、128 像素实验结果



图 5-24 立体玩偶及其 32 像素、64 像素、128 像素实验结果

系统的分辨率由投影到目标物体表面 Hadamard 基底图案最小的矩阵元决定，而这个最小的矩阵元可通过设定不同大小像素值来改变，而投影矩阵元会随物体表面到投影仪距离变远而变宽，系统成像分辨率还会受到物体到投影仪距离远近影响。

5.7 本章小结

本章采用基扫描单像素成像方法，以树莓派为核心，提出了基于树莓派的单像素成像系统以及基于树莓派的彩色单像素成像系统。系统采用投影仪对目标物体投影 Hadamard 基底图案，最终成功重构了高质量的物体图像，验证了设计方案及系统的可行性。

第六章 总结与展望

本文针对单像素成像技术的优势设计并实现了三种不同的单像素成像系统，分别利用 DMD，LCoS，激光投影仪等空间光调制器件对信号光源进行调制，并分别实现了对不同类型及大小的目标物体的单像素成像。通过实验证明搭建的三个系统是有效且可行的，这将有望为单像素成像技术的实际应用开辟新道路。

单像素成像技术投入到实际应用当中，目前已经有了较为良好的成像探测和数据采集技术，满足了在弱光条件下和对相位物体成像，降低实验成本的基本的要求，但是从全局来看，单像素成像系统技术系统仍有很大进步空间。

1、成像效果还不够理想，本文中所设计出来的单像素成像系统与目前传统阵列探测器成像相比，结果图像质量不够具有优势，且成像物体较为单一，难以满足人们日新月异生产生活需要。但随着计算机技术发展，越来越多的人尝试通过深度学习方法来提高单像素成像质量以及效率，并取得不菲的成果。

2、成像时间太久，本文中实现的三个不同的单像素成像系统达到文章中理想的实验结果用时无法和阵列探测器比拟，这主要是受制于单像素成像技术的特点，此技术的成像方式决定了它无法像普通相机一样很快出图，无法对动态物体成像，但这并不表明在降低成像时间上不会有改进空间，随着科学技术发展可以借助效率更高的空间光调制器件来提高成像速度，也可以改进成像算法来降低成像所需时间。

3、实现复振幅单像素成像系统可以考虑在加显微物镜来实现相位调制的显微成像，以及对真实生物组织的成像可能。

4、除此之外，文章中强调提出的这些系统是采用的可见照明，但它们同样适用于非可见照明，相较其他成像方式而言，单像素成像在非可见照明时更具优势。

相信在不远的将来，单像素成像技术会是传统成像的有力补充。

参考文献

- [1] Kirmani A, Venkatraman D, Shin D, et al. First-photon imaging[J]. *Science*, 2014, 343(6166): 58-61.
- [2] Liu X, Shi J, Wu X, et al. Fast first-photon ghost imaging[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 5012.
- [3] Liu X, Shi J, Sun L, et al. Photon-limited single-pixel imaging[J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8132-8144.
- [4] Parsin Haji Reza, Kevan Bell, Wei Shi, James Shapiro, and Roger J. Zemp, "Deep non-contact photoacoustic initial pressure imaging," *Optica* 5, 814-820 (2018)
- [5] Wei Liu, Zhihao Zhou, Lei Chen, Xin Luo, Yuehan Liu, Xianfeng Chen, and Wenjie Wan, "Imaging through dynamical scattering media by two-photon absorption detectors," *Opt. Express* 29, 29972-29981 (2021).
- [6] J. Maillard, "From 1D-FTS to Imaging FTS in astronomy," in *Fourier Transform Spectroscopy and Hyperspectral Imaging and Sounding of the Environment*, OSA Technical Digest (online) (Optica Publishing Group, 2015), paper FT3A.1.
- [7] Yiwei Zhang, Graham M. Gibson, Matthew P. Edgar, Giles Hammond, and Miles J. Padgett, "Dual-band single-pixel telescope," *Opt. Express* 28, 18180-18188 (2020).
- [8] Ningbo Chen, Jia Yu, Liangjian Liu, Zhiqiang Xu, Rongkang Gao, Tao Chen, Liang Song, Wei Zheng, and Chengbo Liu, "Video-rate high-resolution single-pixel nonscanning photoacoustic microscopy," *Biomed. Opt. Express* 13, 3823-3835 (2022).
- [9] M. Ochoa, A. Rudkouskaya, R. Yao, P. Yan, M. Barroso, and X. Intes, "High compression deep learning based single-pixel hyperspectral macroscopic fluorescence lifetime imaging in vivo," *Biomed. Opt. Express* 11, 5401-5424 (2020).
- [10] Tao Wang, Lei Yu, and Jing Lin, "Coastal shallow waters explorer imaging spectrometer for aerial remote sensing of shallow waters in UV-VIS-NIR broadband," *Appl. Opt.* 60, 1566-1573 (2021).
- [11] Shuai Liu, Xu-Ri Yao, Xue-Feng Liu, Da-Zhi Xu, Xing-Da Wang, Bing Liu, Chao Wang, Guang-Jie Zhai, and Qing Zhao, "Pile-up effect in an infrared single-pixel compressive LiDAR system," *Opt. Express* 27, 22138-22146 (2019).

参考文献

- [12] Mir M, Bhaduri B, Wang R, et al. Quantitative phase imaging[J]. Progress in optics, 2012, 57(133-37): 217.
- [13] H. Zhang, L. Cao, H. Zhang, and G. Jin, "Single-pixel imaging around a corner using Fourier spectrum acquisition," in Imaging and Applied Optics 2016, OSA Technical Digest (online) (Optica Publishing Group, 2016), paper JT3A.31.
- [14] Shenyu Zhu, Yong Meng Sua, Patrick Rehain, and Yu-Ping Huang, "Single photon imaging and sensing of highly obscured objects around the corner," Opt. Express 29, 40865-40877 (2021).
- [15] Yang Liu, Jinli Suo, Yuanlong Zhang, and Qionghai Dai, "Single-pixel phase and fluorescence microscope," Opt. Express 26, 32451-32462 (2018).
- [16] Peter Kocsis, Igor Shevkunov, Vladimir Katkovnik, Heikki Rekola, and Karen Egiazarian, "Single-shot pixel super-resolution phase imaging by wavefront separation approach," Opt. Express 29, 43662-43678 (2021).
- [17] Jian Huang, Zhicai Li, Dongfeng Shi, Yafeng Chen, Kee Yuan, Shunxing Hu, and Yingjian Wang, "Scanning single-pixel imaging lidar," Opt. Express 30, 37484-37492 (2022).
- [18] Lukáš Klein, Arne S Kristoffersen, Jan Touš, and Karel Žídek, "Versatile compressive microscope for hyperspectral transmission and fluorescence lifetime imaging," Opt. Express 30, 15708-15720 (2022).
- [19] Kebin Fan, Jonathan Y. Suen, and Willie J. Padilla, "Graphene metamaterial spatial light modulator for infrared single pixel imaging," Opt. Express 25, 25318-25325 (2017)
- [20] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. Physical Review A, 1995, 52(5): R3429-R3432.
- [21] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(11): 113601.
- [22] Takhar D, Laska J N, Wakin M B, et al. A new compressive imaging camera architecture using optical-domain compression[C]/Computational Imaging IV. SPIE, 2006, 6065: 43-52.
- [23] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. Physical Review A, 2008, 78(6): 061802.
- [24] Duarte M F, Davenport M A, Takhar D, et al. Single-pixel imaging via compressive sampling [J]. IEEE signal processing magazine, 2008, 25(2): 83-91.

- [25] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y. Compressive ghost imaging[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(13): 131110.
- [26] Kirmani A, Venkatraman D, Shin D, et al. First-photon imaging[J]. Science, 2014, 343(6166): 58-61.
- [27] Sun M J, Edgar M P, Gibson G M, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution[J]. Nature communications, 2016, 7(1): 1-6.
- [28] Liu X, Shi J, Wu X, et al. Fast first-photon ghost imaging[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 5012.
- [29] Pere Clemente, Vicente Durán, Enrique Tajahuerce, Pedro Andrés, Vicent Climent, and Jesús Lancis, "Compressive holography with a single-pixel detector," Opt. Lett. 38, 2524-2527 (2013).
- [30] Liu Y, Suo J, Zhang Y, et al. Single-pixel phase and fluorescence microscope[J]. Optics express, 2018, 26(25): 32451-32462.
- [31] Shupeng Zhao, Ruijing Liu, Pei Zhang, Hong Gao, and Fuli Li, "Fourier single-pixel reconstruction of a complex amplitude optical field," Opt. Lett. 44, 3278-3281 (2019).
- [32] Hu X, Zhang H, Zhao Q, et al. Single-pixel phase imaging by Fourier spectrum sampling[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(5): 051102.
- [33] Zhang Z, Ma X, Zhong J. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition[J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 6225-6230.
- [34] Zibang Zhang and Jingang Zhong, "Three-dimensional single-pixel imaging with far fewer measurements than effective image pixels," Opt. Lett. 41, 2497-2500 (2016).
- [35] 张雷洪, 袁晓, 张大伟. 在课堂上实现基于激光投影仪和哈达玛矩阵的关联成像研究[J]. 应用激光, 2018, 38(5): 879.
- [36] Radwell N, Mitchell K J, Gibson G M, et al. Single-pixel infrared and visible microscope[J]. Optica, 2014, 1(5): 285-289.
- [37] Zeng B, Huang Z, Singh A, et al. Hybrid graphene metasurfaces for high-speed mid-infrared light modulation and single-pixel imaging[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(1): 1-8.
- [38] Edgar M, Gibson G M, Bowman R W, et al. Simultaneous real-time visible and infrared video with single-pixel detectors[J]. Scientific reports, 2015, 5(1): 1-8.
- [39] Gattinger P, Kilgus J, Zorin I, et al. Broadband near-infrared hyperspectral single pixel imaging for chemical characterization[J]. Optics express, 2019, 27(9): 12666-12672.

参考文献

- [40] Jiang W, Jiao J, Guo Y, et al. Single-pixel camera based on a spinning mask[J]. Optics Letters, 2021, 46(19): 4859-4862.
- [41] Shrekenhamer D, Watts C M, Padilla W J. Terahertz single pixel imaging with an optically controlled dynamic spatial light modulator[J]. Optics express, 2013, 21(10): 12507-12518.
- [42] Stantchev R I, Yu X, Blu T, et al. Real-time terahertz imaging with a single-pixel detector[J]. Nature communications, 2020, 11(1): 1-8.
- [43] Vallés A, He J, Ohno S, et al. Broadband high-resolution terahertz single-pixel imaging[J]. Optics Express, 2020, 28(20): 28868-28881.
- [44] Stantchev R I, Sun B, Hornett S M, et al. Noninvasive, near-field terahertz imaging of hidden objects using a single-pixel detector[J]. Science advances, 2016, 2(6): e1600190.
- [45] 陈思潮, 杜良辉, 朱礼国. 太赫兹波计算鬼成像: 原理和展望[J]. 光电工程, 2020, 47(5): 200024-1-200024-13.
- [46] Huang J, Shi D. Multispectral computational ghost imaging with multiplexed illumination[J]. Journal of Optics, 2017, 19(7): 075701.
- [47] Bian L, Suo J, Situ G, et al. Multispectral imaging using a single bucket detector[J]. Scientific reports, 2016, 6(1): 1-7.
- [48] Li Z, Suo J, Hu X, et al. Efficient single-pixel multispectral imaging via non-mechanical spatio-spectral modulation[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-7.
- [49] Olivieri L, Gongora J S T, Peters L, et al. Hyperspectral terahertz microscopy via nonlinear ghost imaging[J]. Optica, 2020, 7(2): 186-191.
- [50] Liu Y, Suo J, Zhang Y, et al. Single-pixel phase and fluorescence microscope[J]. Optics express, 2018, 26(25): 32451-32462.
- [51] Gong W L, Sun J F, Deng C J. Research progress on single-pixel imaging Lidar via coherent detection [J][J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011003.
- [52] Gong W, Zhao C, Yu H, et al. Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint[J]. Scientific reports, 2016, 6(1): 1-6.
- [53] Yang X, Zhang Y, Xu L, et al. Increasing the range accuracy of three-dimensional ghost imaging lidar using optimum slicing number method[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(12): 124202.

- [54] Musarra G, Lyons A, Conca E, et al. Non-line-of-sight three-dimensional imaging with a single-pixel camera[J]. Physical Review Applied, 2019, 12(1): 011002.
- [55] Yang W, Zhang C, Jiang W, et al. None-line-of-sight imaging enhanced with spatial multiplexing[J]. Optics Express, 2022, 30(4): 5855-5867.
- [56] Seow K L C, Török P, Foreman M R. Single pixel polarimetric imaging through scattering media[J]. Optics Letters, 2020, 45(20): 5740-5743.
- [57] Kim S, Cense B, Joo C. Single-pixel, single-input-state polarization-sensitive wavefront imaging[J]. Optics Letters, 2020, 45(14): 3965-3968.
- [58] Liang J, Tian X, Tu X, et al. Color full stokes polarization fringe projection 3D imaging[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 130: 106088.
- [59] He Y-H, Zhang A-X, Li M-F, et al. High-resolution sub-sampling incoherent x-ray imaging with a single-pixel detector[J]. APL Photonics, 2020, 5(5): 056102.
- [60] Greenberg J, Krishnamurthy K, Brady D. Compressive single-pixel snapshot x-ray diffraction imaging[J]. Optics Letters, 2014, 39(1): 111-114.
- [61] Liu H-C, Yang B, Guo Q, et al. Single-pixel computational ghost imaging with helicity-dependent metasurface hologram[J]. Science Advances, 2017, 3(9): e1701477.