

引用格式: Bie Shuhang, Xing Xida, Wang Haonan, et al. Mid-infrared single-pixel imaging with a cyclic masks[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(8):0804002

别书航,邢希达,王浩楠,等. 基于旋转码盘的中红外单像素成像[J]. 光子学报, 2026, 55(8):0804002

基于旋转码盘的中红外单像素成像

别书航¹,邢希达²,王浩楠¹,杨恩州¹,贾婧媛¹,商宝富²,张新彬²,刘星宇²,
李敏²,任浩楠¹,曹曦¹

(1 大连理工大学光电工程与仪器科学学院,辽宁 大连 116000)

(2 山东北方光学电子有限公司,山东 泰安 271000)

摘 要:传统中红外成像技术(如制冷型红外焦平面阵列)依赖昂贵的光电阵列探测器,且存在系统复杂、功耗高、响应速度受限等问题,难以满足低成本、高帧频的应用需求。针对这一挑战,本文提出了一种基于旋转码盘调制的中红外单像素成像方法。该方法利用高速旋转的编码盘对中红外光束进行动态空间光调制,仅需一个单点探测器即可实现信号采集,最后结合快速傅里叶变换算法实现高质量图像的快速重建。实验结果表明,该系统在 3–5 μm 波段可实现 kHz 级调制速率,并显著降低硬件成本与功耗。相较于传统阵列式成像,该方案在保持较高空间分辨率的同时,具备更好的环境适应性,为工业检测、生物医学及气体传感等领域提供了新的技术路径。

关键词:中红外波段;单像素成像;旋转码盘;空间光调制;快速傅里叶变换算法

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20265508.0804002

0 引言

中红外(Mid infrared, MIR)成像技术因其能够获取物体独特的热特性与分子信息,在工业检测、医疗诊断、环境监测以及国防安全等领域发挥着重要作用^[1-2]。然而,该技术在实际应用中仍面临显著挑战。尤其在室温工作条件下,基于窄带隙半导体的传统焦平面阵列受暗电流和热噪声的严重影响,导致探测灵敏度不足,难以满足远距离遥感、深层材料穿透及生物样品无损检测等高要求场景的需要^[3-4]。尽管新兴低维材料传感器在提高工作温度方面展现出潜力,其噪声等效功率仍远未达到单光子水平^[5-6];而超导纳米线探测器虽在低温条件下可实现优异的光子计数性能^[7-8],却受限于庞大的制冷系统和大尺寸阵列制备技术的不成熟,制约了其实际应用。因此,发展能够在室温下实现高灵敏度、高空间分辨率与宽视场的 MIR 探测技术,仍是当前该领域亟待突破的关键问题^[9-11]。

单像素成像,又被称为“单像素相机”,作为计算成像领域的重要分支,近年来呈现出快速发展的态势,提供了一种全新的成像架构^[12-15]。其核心原理为:将单元素探测器与空间编码掩模协同应用,通过时序变化的结构化照明图案对目标场景的空间信息进行编码,利用单像素探测器采集光强信号^[16],再结合已知编码图案与重建算法完成目标图像的恢复^[17]。该技术有效克服了传统阵列探测器在材料制备工艺及制冷条件方面的制约,为研制室温工作、高灵敏度、宽视场的中红外成像系统开辟了新的技术方向^[18-20]。文献^[21]提出了一种基于中红外编码的成像方案,利用数字微镜阵列(Digital Micromirror Devices, DMD)加载时序变化的结构化图案来对泵浦光进行调制,间接完成中红外信号光的空间信息编码;接着借助红外上转换技术,实现了中红外高灵敏成像。然而,目前单像素成像系统中所采用的空间光调制器主要依赖 DMD,其不仅镀膜工艺复杂、成本高昂,还导致整体系统结构复杂、不利于集成与应用推广。

基金项目:本研究由空天飞行技术全国重点实验室基金(0301D2024000000040489900),国家青年科学基金项目(62305043)资助

通讯作者:caotun1806@dlut.edu.cn; lmin5808@163.com

收稿日期:2026-02-26; **录用日期:**2026-05-20

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

针对上述问题,本文提出一种结构简单、调制速度快的中红外单像素成像(Mid infrared single pixle imaging, MIR-SPI)方法。该方法通过在蓝宝石基底上镀铬制备旋转码盘,实现对光场的快速调制,从而代替传统的中红外阵列探测方式,具有制造工艺简便、无需复杂控制电路等优势。在图像重建方面,采用快速傅里叶变换重构算法对采集信号进行解调,能够有效还原目标图像信息。此外,本文还对比了不同重构算法下在低采样率情况下的重构结果,为MIR-SPI进一步的快速成像奠定了基础。

1 理论与方法

MIR-SPI成像的基本原理如图1所示:中红外光源发出的红外光束经透镜系统准直扩束后照射在物体上,透射光场由成像透镜将物体成像于旋转码盘的调制区域,然后再通过收集透镜将调制后的光场汇聚至中红外单像素探测器进行探测。在该系统中,探测器接收到的总光强与物体的透射(或反射)光强及码盘的调制模式密切相关。

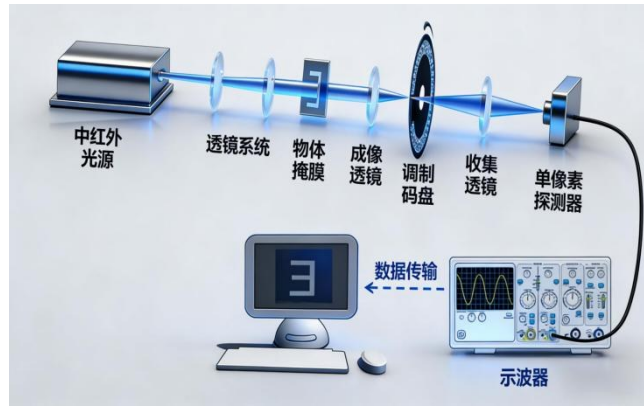


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

理想情况下,该关系可表示为:

$$I = \int_{\Omega} S(x, y) T(x, y) dx dy. \#(1)$$

其中, I 为桶探测器测得的信号值, Ω 为照明区域, (x, y) 为码盘平面的二维坐标, $S(x, y)$ 表示调制模式分布, $T(x, y)$ 表示物体的透射率分布。然而,实际成像过程中存在环境杂散光与探测器暗电流等干扰因素。综合考虑这些影响后,实际测得的信号可修正为:

$$Y = \int_{\Omega} S(x, y) T(x, y) dx dy + N. \#(2)$$

其中 Y 为实际采集的桶信号, N 为各类噪声的总体贡献。由此,在成像光路中通过单像素探测器可获得包含噪声的一维桶信号。

所提出的 MIR-SPI 系统通过旋转码盘进行空间光调制,其核心调制单元基于循环 S 矩阵,该矩阵通过“孪生素数构造法”生成^[22],阶数为 $p \times q$ 。该矩阵的编码结构确保了目标空间信息在调制过程中的完整性,具备良好的数学可逆性,并支持基于快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的高效图像重建。

在制作过程中,首先借助 MATLAB 生成对应的矩形制版图案,其中包含用于中红外光场调制的二进制编码区域,以及一个用于在旋转过程中产生同步信号的纯黑参考区块,如图 2(a)所示。随后,将该矩形图案精确转换为环形布局,并通过光刻工艺将其转移至圆形调制盘上,最终形成适用于中红外波段的专用旋转调制码盘,如图 2(b)所示。码盘上每一行 S 矩阵元素构成一个独立的调制单元,在旋转过程中依次对中红外光场进行空间编码,有效实现了对该波段光强的动态调控。

为了从采集到的一维桶信号中重建出物体的二维图像,需要将一系列已知的调制模式与对应的桶探测器信号值进行关联计算。在本系统中,旋转码盘上编码的是一组预先设计好的循环 S 矩阵。设码盘在旋转过程中依次产生了 N 个不同的调制模式,每个模式被重塑为二维图像后拉直为一个行向量,将所有 N 个模

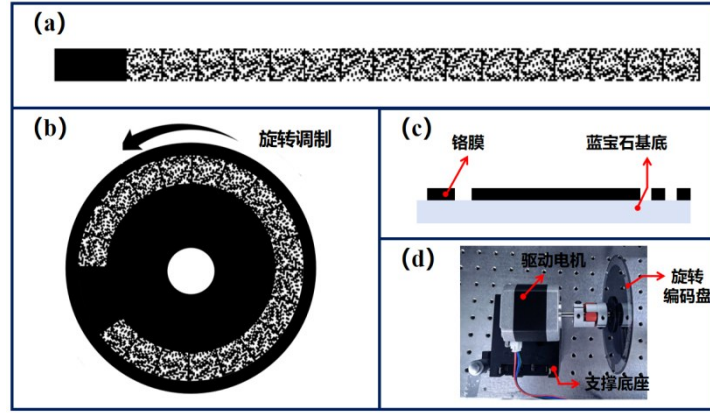


图2 中红外调制掩膜的设计与制备。(a) 基于循环S矩阵的矩形二进制编码图案;(b)设计的环形编码码盘;(c)旋转编码码盘的光刻结构示意图;(d)旋转编码码盘及其驱动系统实物图

Fig. 2 Design and fabrication of a mid-wave infrared modulation mask. (a) Rectangular binary coding pattern based on the cyclic S-matrix; (b) The designed annular encoding mask; (c) Schematic of the photolithography structure using a rotating encoding mask; (d) Photograph of the rotating encoding mask and its driving system.

式的行向量堆叠,即可构成一个 $N \times M$ 的测量矩阵 S ,其中 M 是图像的总像素数。相应地,单像素探测器同步采集到 N 个桶信号值,组成一个列向量 Y 。在不考虑噪声的理想情况下,成像过程可以表述为如下的线性模型

$$Y = SX. \#(3)$$

其中 X 为待重建物体图像的列向量形式。为从中求解 X ,需对测量矩阵 S 进行逆变换。由于循环S矩阵具有良好的数学性质,其逆矩阵可解析地表示为:

$$S^{-1} = \frac{2}{n+1} (2S^T - J_n). \#(4)$$

其中 J_n 是元素全为1的矩阵。更重要的是,得益于S矩阵的循环特性,整个重建过程可以在频域中通过FFT算法高效完成,将计算复杂度从 $O(N^2)$ 降低至 $O(N \log N)$,从而满足实时成像的需求。重建公式在频域中表示为:

$$\hat{X} = F^{-1} \left\{ \frac{F\{Y\}}{F\{s_1\}} \right\}. \#(5)$$

这里, F 和 F^{-1} 分别表示傅里叶变换和逆变换, s_1 是循环S矩阵的第一行,除法是在频域上进行的逐元素除法。因此,通过将旋转码盘产生的S矩阵序列作为调制模式,并利用其数学特性进行快速逆变换,即可从单像素探测器采集到的一维桶信号中高效、准确地重建出物体的二维图像。如图2(c)所示,本系统选用在中红外波段具有高透过率的蓝宝石作为码盘基底,并在其表面镀覆铬膜以构成调制功能层。蓝宝石基底在中红外波段具有较高的光学透过率,而镀铬区域则表现出较强的反射特性与光学不透明性。两者在透射率上存在显著差异,使所制备的码盘形成了低透射区(铬膜区域)与高透射区(蓝宝石区域)交替排列的调制结构。旋转编码盘及其驱动系统的实物结构如图2(d)所示,该结构在中红外波段可实现高消光比的二值化光学调制,从而满足系统对红外光信号进行精确控制的要求。

2 仿真与实验结果

为验证所设计的旋转编码盘在SPI系统中的调制效果,本研究首先开展了基于SPI的数值仿真实验。仿真实验中选取USAF1951分辨率板图片作为成像目标,并采用前述孪生质数法生成具有 101×103 像素规模的S型循环Hadamard矩阵。具体数值仿真流程如下:首先,基于生成的S型循环Hadamard矩阵构造编码盘调制模式,将其依次与靶标图像进行点乘运算,模拟光学调制过程并生成对应的光强序列;随后,累加各调制后的图像全部像素值,模拟单像素探测器对总光强的采集;最后,将所得一维光强序列作为输入,利用FFT算法执行图像重建,最终输出重构的二维图像。本实验所有算法均在相同硬件平台下运行,具体配置

如下:CPU为Intel Core i7-13700H(主频2.40 GHz,最大睿频5.00 GHz,14核20线程),GPU为NVIDIA GeForce RTX 4060(8 GB显存),内存为16 GB。

在SPI系统中,实现高质量的欠采样重建是降低数据量、提升成像速度的关键,对于推动该技术在场景中的应用具有重要意义。因此为系统评估本方案在压缩成像条件下的性能,还对比了差分鬼成像算法(Differential Ghost Imaging, DGI)、梯度下降算法(Gradient Descent, GD)、基于泊松噪声的算法(Poisson)、交替投影算法(Alternating Projection, AP)、稀疏约束重建算法(Sparse)、FFT算法以及全变分最小化算法(Total Variation, TV)共七种SPI中常用的重构算法在不同采样率下的表现。实验结果如图3所示,各行分别是七种算法的重建结果,各列分别对应七种算法(在不同采样率)的重建结果。

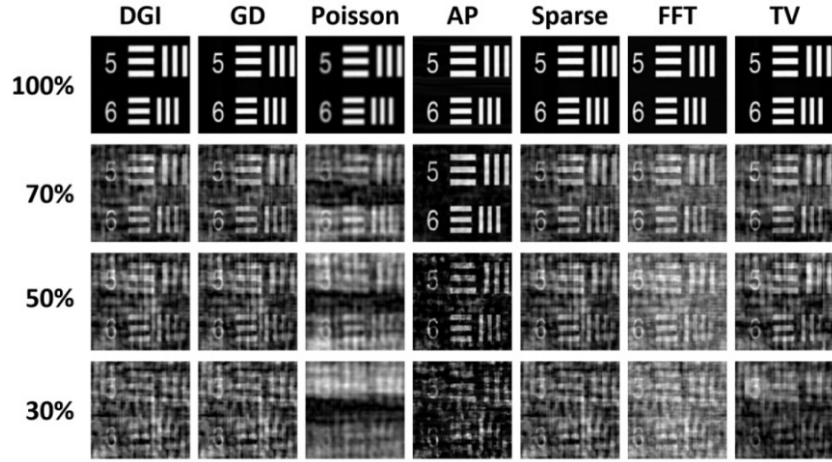


图3 不同采样率(100%、70%、50%、30%)下各算法的图像重构结果

Fig. 3 Image reconstruction results of different algorithms at various sampling rates (100%, 70%, 50%, 30%).

由图3所重构的结果能够看出,在满采样率时七种算法均能重构出质量较好的图片,这是因为所采用的调制矩阵为S基循环矩阵,具有正交归一的特征,因此在满采样的情况下理论上能够获得理想的成像效果。而在低采样率的情况下,如70%采样率的情况下,AP算法则表现出更好的性能。为了更直观地对比不同算法的重构效果,这里采用峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)和结构相似度(Structural Similarity Index Measure, SSIM)来定量分析该重构方法和其他算法在该SPI系统中的重构质量。其中PSNR可被定义为

$$PSNR = 10\log_{10}\left(\frac{MAX_K^2}{MSE}\right). \#(6)$$

其中, MAX_K^2 为图像的最大值,这里的 MSE 可具体表示为

$$MSE = \frac{1}{xy} \sum_{a=1}^x \sum_{b=1}^y [J(a, b) - K(a, b)]^2. \#(7)$$

这里 $J(a, b)$ 和 $K(a, b)$ 分别表示真实物体图像和对应的重建图像,其中 a 和 b 表示该图像中的行坐标和列坐标。SSIM是评价两幅图像之间相似性的标准,在图像处理领域中通常用于评估图像质量。它是基于比较测试图像和参考图像的亮度,对比度,和结构三项参数进行计算的。SSIM的公式可以被写为

$$SSIM = \frac{(2\mu_J\mu_K + c_1)(2\sigma_{JK} + c_2)}{(\mu_J^2 + \mu_K^2 + c_1)(\sigma_J^2 + \sigma_K^2 + c_2)}. \#(8)$$

其中 J 和 K 是要比较的两幅图像, μ_J 和 μ_K 是它们的平均灰度值, σ_J 和 σ_K 是标准差, σ_{JK} 是两幅图像之间的协方差, c_1 和 c_2 是避免零分母的小常数。SSIM的值范围通常为-1到1,其中1表示两幅图像之间的完全相似性。原始仿真图片被选择作为参考图片,不同重构算法在50%采样率下的重构图像作为输入图片,进行PSNR和SSIM计算,其结果如图4所示。

图4结果表明,在采样率为50%时,AP算法重构质量是13.62 dB,结构相似度是0.40,均高于其他算法所重构出的图像质量。该结果为后续编码方式的优化奠定了基础。为进一步提升MIR-SPI系统性能,在关

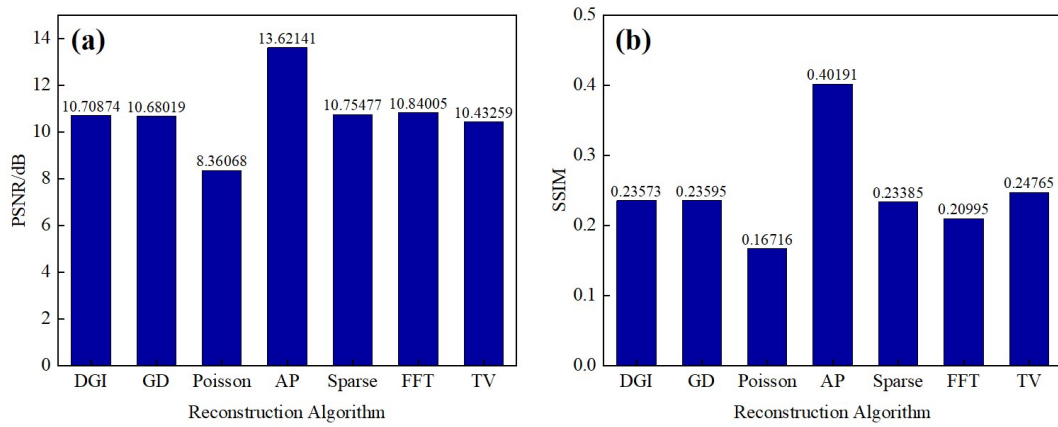


图4 50%采样率下各算法重构图像质量分析(a) PSNR;(b)SSIM

Fig. 4 Evaluation of reconstructed image quality at a 50% sampling rate: (a) PSNR; (b) SSIM

注低采样率下重构质量的同时,也需考虑算法的运行效率以满足实时性需求。为此,本文进一步对比了上述七种算法在满采样率下的重构时间,结果如图5所示。

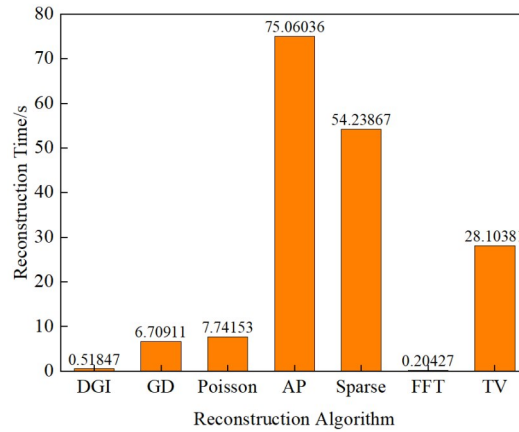


图5 不同算法在满采样率下的图片重构时间

Fig. 5 Run time comparison of different algorithms for image reconstruction at full sampling rate

从图中可以看出,在满采样率条件下,AP算法的重构时间同样最长,达到75.06 s,这主要源于其复杂的迭代优化过程;相比之下,FFT算法的重构时间最短,仅为0.20 s。为满足MIR-SPI系统对实时性的要求,在后续实验验证中,将采用FFT算法进行满采样率下的图像重构。

为验证MIR-SPI成像方案的可行性,依据图1所示原理搭建了实验系统。系统中,中红外光源采用高红外发射率的陶瓷加热板,其工作温度最高可达500℃,其中红外光谱曲线如图6所示。该光源在2~5 μm波长范围内呈现宽谱辐射特性,辐射强度随波长增加而增强。

实验系统中主要参数如下,首先透镜组由焦距分别为150 mm与50 mm的氟化钙透镜构成,用于对中红外辐射进行准直与扩束,并照明由铜制金属掩膜物体的数字“9”。然后物体所成的像通过焦距为75 mm的氟化钙透镜,投影至旋转编码掩膜的有效编码区域,从而实现对光场的空间调制。该有效编码区域采用大小为41×43像素的S基矩阵结构,因此编码掩膜每旋转一周,可对光场进行41×43=1763次有效调制。实验中,旋转码盘的转速为8 rps,故调制速率达8×1763≈14 kHz。随后使用焦距50 mm的氟化钙透镜将被调制光场汇聚至中红外单像素探测器(Thorlabs, PDA07P2),从而完成信号采集。最终,利用FFT算法对采集到的时间序列信号进行图像重构。

实验结果如图7所示,其中图7(a)为上述MIR-SPI系统中探测器实际捕获到的单像素信号。该信号中可清晰分辨出由码盘同步标记产生的周期性光强峰值,相邻两个峰值之间的信号区域对应于一个完整调制

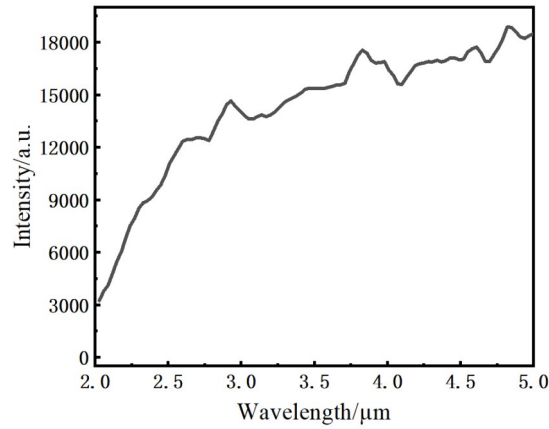


图6 实验光源的中红外光谱曲线

Fig. 6 Mid-infrared spectral curve of the experimental light source.

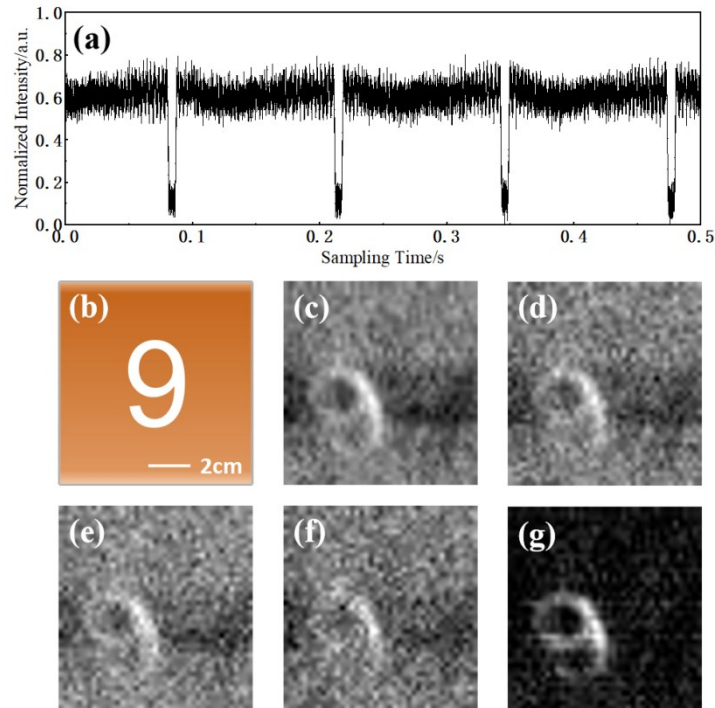


图7 单像素成像的图像重构结果。(a)实验中采集到的单像素信号;(b)铜制金属掩膜物体;(c)-(f)分别在100%,70%,50%和30%采样率下通过FFT算法直接重构获得的图像;(g)通过噪声优化算法处理(c)后获得的图像

Fig. 7 Results of image reconstruction in single-pixel imaging. (a) Single-pixel signal acquired in the experiment; (b) Copper metal-mask object; (c)-(f) Images directly reconstructed using the FFT algorithm at sampling rates of 100%, 70%, 50%, and 30%, respectively; (g) Image obtained by processing (c) with a noise-optimization algorithm.

周期内的探测值序列。通过对该信号进行阈值检测与周期分割,并结合线性插值进行重采样,即可获得与调制矩阵序列精确对应的探测信号。图7(b)为待成像的透射式目标物体(数字“9”),图7(c)为基于FFT重建算法得到的中红外单像素图像。可以看出,重建图像较好地再现了目标物体的轮廓与结构特征,验证了本文方法在中红外波段实现单像素成像的可行性。然而原始重建图像中存在一定的背景噪声与伪影,这主要是由于码盘平面相对于旋转轴线存在一定的倾斜角,因此在转动时会产生偏移误差。图7(d)-(f)分别为采样率为70%、50%、30%时的重构图像。从结果可以看出,随着采样率的逐渐降低,重构图像的质量也随之下降,物体的特征信息逐渐变得模糊。图7(g)为通过噪声优化算法处理图7(c)后的重建结果,该算法基于灰度值非线性校正原理,通过自适应调整灰度映射曲线,在保留关键结构特征的同时抑制噪声区域的灰度波动。经过噪声优化处理后,图像质量得到显著提升,背景干扰得到有效抑制,上述实验结果有效验证了

通过所设计的旋转掩膜实现 MIR-SPI 的可行性。

3 结论

本文成功设计并验证了一种基于旋转码盘调制的 MIR-SPI 系统。该系统采用结构简单的旋转编码盘配合中红外单点探测器,有效避免了传统中红外成像中对昂贵焦平面阵列的依赖。通过对多种单像素重建算法在低采样率下的重建质量与运行效率进行系统比较,为在保证图像质量的同时进一步降低数据量、提升成像速度提供了关键依据。实验部分搭建了对应的 MIR-SPI 平台,成功实现了空间分辨率为 41×43 像素、调制频率达 14 kHz 的红外成像,该方案显著降低了中红外成像系统的成本与复杂度。考虑到实际应用中机械振动与温度变化可能对系统成像稳定性产生干扰,未来可通过采用高精度伺服电机结合闭环位置反馈控制,并引入温度补偿校准机制等优化策略,进一步提升系统的环境适应性与运行可靠性。

参考文献

- [1] EBRAHIM-ZADEH M, SOROKINA I T. Mid-Infrared Coherent Sources and Applications[M]. Springer, 2008.
- [2] VODOPYANOV K L. Laser-Based Mid-Infrared Sources and Applications[M]. Wiley, 2020.
- [3] RAZEGHI M, NGUYEN B M. Advances in mid-infrared detection and imaging: a key issues review[J]. Reports on Progress in Physics, 2014, 77(8): 082401.
- [4] WANG P, XIA H, LI Q, et al. Sensing infrared photons at room temperature: from bulk materials to atomic layers[J]. Small, 2019, 15(46): 1904396.
- [5] LIU C, GUO J, YU L, et al. Silicon/2D-material photodetectors: from near-infrared to mid-infrared[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10(1): 123.
- [6] WU J, WANG N, YAN X, et al. Emerging low-dimensional materials for mid-infrared detection[J]. Nano Research, 2021, 14(6): 1863-1877.
- [7] MARSILI F, BELLEI F, NAJAFI F, et al. Efficient single photon detection from 500 nm to 5 μm wavelength[J]. Nano Letters, 2012, 12(9): 4799-4804.
- [8] LIU X, KUYKEN B, ROELKENS G, et al. Bridging the mid-infrared to-telecom gap with silicon nano-photonic spectral translation[J]. Nature Photonics, 2012, 6(10): 667-671.
- [9] MANCINELLI M, TRENTI A, PICCIONE S, et al. Mid-infrared coincidence measurements on twin photons at room temperature[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 15184.
- [10] MCCracken R A, GRAFFITTI F, FEDRIZZI A. Numerical investigation of mid-infrared single-photon generation [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2018, 35(12): C38-C48.
- [11] SUA Y M, FAN H, SHAHVERDI A, et al. Direct generation and detection of quantum correlated photons with 3.2 μm wavelength spacing[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 17494.
- [12] MAIT J N, EULISS G W, ATHALE R A. Computational imaging[J]. Advances in Optics and Photonics, 2018, 10(2): 409-483.
- [13] MOREAU P A, TONINELLI E, GREGORY T, et al. Ghost imaging using optical correlations[J]. Laser & Photonics Reviews, 2017, 12(1): 1700143.
- [14] EDGAR M P, GIBSON G M, PADGETT M J. Principles and prospects for single-pixel imaging[J]. Nature Photonics, 2019, 13(1): 13-20.
- [15] GIBSON G M, JOHNSON S D, PADGETT M J. Single-pixel imaging 12 years on: a review[J]. Optics Express, 2020, 28(19): 28190-28208.
- [16] ALTMANN Y, MCLAUGHLIN S, PADGETT M, et al. Quantum-inspired computational imaging [J]. Science, 2018, 361(6403): eaat2298.
- [17] ZHANG K, LI Y, ZUO W, et al. Plug and-play image restoration with deep denoiser prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 44(10): 6360-6376.
- [18] KIRMANI A, VENKATRAMAN D, SHIN D, et al. First-photon imaging[J]. Science, 2014, 343(6166): 58-61.
- [19] SUN M J, EDGAR M, GIBSON G, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 12010.
- [20] SHIN D, XU F, VENKATRAMAN D, et al. Photon-efficient imaging with a single-photon camera[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 12046.
- [21] WANG Y, HUANG K, FANG J, et al. Mid-infrared single-pixel imaging at the single-photon level[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 1073.
- [22] KILCULLEN P, OZAKI T, LIANG J. Compressed ultrahigh-speed single-pixel imaging by swept aggregate patterns [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 7879.

Mid-infrared single-pixel imaging with a cyclic masks

Bie Shuhang¹, Xing Xida², Wang Haonan¹, Yang Enzhou¹, Jia Jingyuan¹, Shang Baofu², Zhang Xinbin², Liu Xingyu², Li Min², Ren Haonan¹, Cao Tun¹

(1 School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

(2 Shandong North Opto—Electronics Co., Ltd., Taian 271000, Shandong, China)

Abstract: Conventional mid-infrared (MIR) imaging technologies, such as cryogenically cooled infrared focal plane arrays, face significant limitations including high cost, system complexity, high power consumption, and restricted response speed, hindering their application in cost-sensitive and high-frame-rate scenarios. To address these challenges, this study aims to propose and validate a novel, simplified MIR single-pixel imaging (SPI) approach. The core objective is to develop a high-speed, low-cost MIR imaging system that circumvents the need for expensive array detectors by employing a simple rotating coded disk for spatial light modulation, thereby providing a new technical pathway for applications in industrial inspection, biomedicine, and gas sensing. This paper proposes a MIR single-pixel imaging method based on a rotating coded disk for spatial light modulation. The system utilizes a mid-infrared light source to illuminate the target. The transmitted (or reflected) light field is then imaged onto a high-speed rotating coded disk fabricated by patterning a chromium film on a sapphire substrate. This disk dynamically modulates the light field according to a pre-designed cyclic S-matrix pattern. The modulated light is collected by a single-pixel MIR detector, generating a one-dimensional bucket signal sequence. For image reconstruction, a fast Fourier transform (FFT)-based algorithm that exploits the mathematical properties of the cyclic S-matrix is primarily employed to efficiently recover the two-dimensional image from the bucket signal. Furthermore, the performance of various reconstruction algorithms—including Differential Ghost Imaging (DGI), Quadratic Programming (QP), Sparse Constraint Reconstruction (SPARSE), FFT, and Total Variation Minimization (TV)—under different sampling rates is comparatively analyzed through simulations to evaluate image quality and processing speed. Algorithm Comparison (Simulation): Numerical simulations using a USAF1951 resolution chart target compared five reconstruction algorithms at sampling rates of 100%, 70%, 50%, and 30% (Fig. 3). Quantitative analysis using Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) and Structural Similarity Index Measure (SSIM) at 50% sampling rate indicated that a specific iterative algorithm (AP) offered superior reconstruction quality under compressive sampling conditions (Fig. 4). However, the FFT algorithm demonstrated the shortest reconstruction time at full sampling rate (0.20 seconds), making it most suitable for real-time imaging requirements (Fig. 5). Experimental Validation: A proof-of-concept MIR-SPI system was constructed (Fig. 1 schematic). Using a copper mask of the digit "9" as the target (Fig. 6b), the system with a 41×43 pixel S-matrix pattern and a disk rotation speed of 8 rps (equivalent to a 14 kHz modulation rate) successfully acquired the bucket signal (Fig. 6a). The FFT algorithm effectively reconstructed the target image, clearly revealing the digit's structure (Fig. 6c). Background noise and artifacts present in the initial reconstruction, attributed to mechanical jitter during disk rotation, were significantly suppressed using a noise-optimization algorithm, leading to a cleaner final image (Fig. 6d). This experiment confirms the feasibility of the proposed rotating-disk-based MIR-SPI scheme. This study successfully designed, simulated, and experimentally demonstrated a mid-infrared single-pixel imaging system based on a rotating coded disk. The system significantly reduces hardware cost and complexity by replacing expensive MIR focal plane arrays with a simple rotating modulator and a single-pixel detector. It achieves imaging at a spatial resolution of 41×43 pixels with a modulation frequency of 14 kHz. Comparative analysis of reconstruction algorithms provides guidance for balancing image quality and processing speed under different sampling conditions. The proposed scheme offers a promising, simplified, and cost-effective alternative for MIR imaging, with potential for broader application in fields such as industrial non-destructive testing and real-time gas monitoring through further optimization of mechanical stability and reconstruction algorithms.

Key words: Mid-infrared band; Single-pixel imaging; Cyclic masks; Spatial light modulation; Fast Fourier transform algorithm

OCIS Codes: 110.0110; 110.1758; 110.3080

CSTR: 32255.14.gzxb20265508.0804002