

数字微镜器件调制多波长关联成像系统

马菁汀,刘尊龙,王民航,冯 飞,许江盟,张卫杰

(北京华航无线电测量研究所,北京 100013)

摘要: 关联成像是一种新体制成像方法,能够解决一些传统成像技术无法解决的问题,近年来颇受关注。其中,又以基于数字微镜器件(DMD)和空间光调制器(SLM)的计算关联成像发展最快。将 DMD 应用于计算关联成像,利用其调制速度快、反射波段宽的优势,结合压缩感知方法,可在多个波长上获取高质量图像,实现多波长关联成像。多波长关联成像在实现过程中存在几个关键问题,包括赝热光场的有效产生、光场调制中衍射效应和调制噪声的影响,以及高质量图像重建算法等。对上述关键问题进行数值仿真,确定系统最佳工作参数;在此基础上构建多波长关联成像实验系统以验证效果,为关联成像技术的实用化提供了参考。

关键词: 计算关联成像; 数字微镜器件; 多波长

中图分类号: TN958 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0924001

Modulated multi-wavelength correlated imaging system with DMD

Ma Jingting, Liu Zunlong, Wang Minhang, Feng Fei, Xu Jiangmeng, Zhang Weijie

(Beijing Huahang Radio Measurement Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: Correlated imaging is a new imaging method, which attracts a lot of attention in recent years. It offers great potential to solve some problems that traditional imaging technologies cannot solve. Among them, computational correlated imaging based on digital micromirror device (DMD) or spatial light modulator (SLM) developed most rapidly. When DMD was applied in correlated imaging system, high-quality images can be obtained at multi-wavelength, and multi-wavelength correlated imaging was realized, by using the advantages of DMD's high speed and wide reflective spectrum, with the assistance of compressed sensing. Several problems in the system need to be researched on, including the efficient generation of pseudo thermal light, the influence of diffraction effect and modulation noise on the signal, and the high-quality imaging reconstruction algorithm. After determining the optimal system parameters via numerical simulation, an experimental system was built to verify the effectiveness of the technology, which provide an reference to the practical process of correlated imaging.

Key words: computational correlated imaging; DMD; multi-wavelength

0 引言

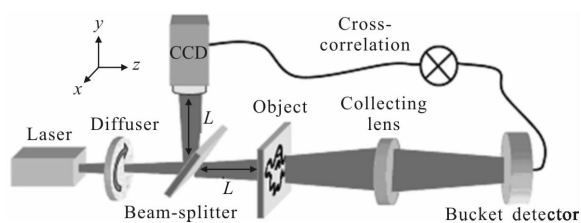
关联成像技术是一种新体制成像方法,其不对目标物体进行直接成像,而是通过使用具有关联特性的光场照射目标,进行关联测量来实现成像。由于其可实现超分辨成像、抗干扰能力强、系统简易,理论上可在任何波段实现等一系列优点,受到了广泛关注^[1-3]。近年来,利用空间光调制的计算关联成像得到了快速发展,其中又以基于数字微镜器件(Digital Micro-mirror Device, DMD)的系统最具发展潜力。DMD 分辨率高、调制速度快、反射波段宽,可实现高速成像,同时可扩展到其他波长,实现多波长关联成像^[3-5]。

文中主要研究利用 DMD 实现多波长关联成像的方法。首先完成基本理论分析,在此基础上,对多波长关联成像系统涉及到的关键技术问题进行数学建模仿真,然后构建成像实验系统,最终完成成像实验和功能验证。

1 系统基本原理

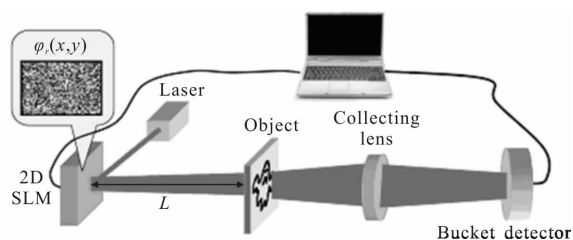
1.1 关联成像原理

关联成像的基本原理如图 1(a)所示,激光经旋



(a) 传统关联成像系统

(a) Traditional correlated imaging system



(b) 计算关联成像系统

(b) Computational correlated imaging system

图 1 关联成像系统

Fig.1 Correlated imaging system

转毛玻璃调制后分为两束,在包含有目标的物光路上,进行探测的是一个无空间分辨力的点探测器;在不包含待成像目标的参考光路中,进行探测的是具有空间分辨能力的 CCD,通过物光路和参考光路测得信号的关联特性,可获得目标信息。物光路中点探测器最终输出的信号为 I_1 ,根据光场的关联特性,目标信息为:

$$G\langle\rho\rangle=\langle I_1 I_2(\rho_2)\rangle-\langle I_1\rangle\langle I_2(\rho_2)\rangle \quad (1)$$

2008 年,计算关联成像首次被提出^[4,6],该方法利用空间光调制器产生赝热光,可获得其先验分布信息,仅需一个点探测器即可成像,如图 1(b)所示。如采用 DMD 进行调制,可将预先载入的图像直接投射到物体所在的空间位置上作为参考臂的散斑场,省去大量计算,更具实用价值。

1.2 压缩感知理论

信号的采样和重建是关联成像的重要环节。压缩感知理论认为,当信号在某一基下可以稀疏表示时,可根据少量观测值重建^[7]。假设一 $N\times 1$ 维信号 x 在某稀疏基 Ψ 下的系数 α 只有 $K\ll N$ 个非零值,即其在此基下稀疏度是 K ,称该信号在 Ψ 下具有稀疏性,可表示为:

$$x=\Psi\alpha \quad (2)$$

为进行非相关测量,需要通过一个与 Ψ 不相关的 $M\times N$ 维矩阵 Φ 对 x 进行观测,得到 M 个观测值,同时考虑噪声的影响:

$$y=\Phi\Psi\alpha+n=A\alpha+n \quad (3)$$

式中: $M=O(K\log(N/K))\ll N$; $A=\Phi\Psi$ 为 $M\times N$ 维观测矩阵; n 为 $M\times 1$ 维观测噪声。

压缩感知理论指出,当矩阵 A 满足受限等距性质时,公式(3)可通过求解 l_1 范数最优化问题精确重建 α :

$$\min\|\alpha\|_1, \text{ s.t. } \|y-A\alpha\|_2<\xi \quad (4)$$

优化求解,其中 ξ 与噪声水平有关。高斯矩阵、伯努利随机矩阵等均满足 RIP 性质。

常用的稀疏恢复算法有基追踪算法,匹配追踪算法等,以及利用 CVX 凸优化工具包求解。重建 α 后,通过公式(2)即可求得信号 x 。

2 理论模型及数值仿真

计算关联成像涉及到光场的产生、调制、传输、探测。以下分别论述各环节的关键问题。

2.1 赝热光场的产生方法

赝热光场可表示 $E=Ae^{i\theta}$, 通过 DMD 调制模拟的赝热光源, 其可看作由若干点光源叠加而成。假设点光源个数为 N , 对于第 i 个点光源来说, 其相位幅度矢量为 $E_i=A_i e^{j\theta_i}$ 。

各点光源之间应满足以下特性: 任意两个不同基元的相幅矢量相互独立, 任意基元的相幅矢量, 其振幅和相位相互独立^[8]:

$$P(E_m, E_n)=P(E_m)P(E_n) \quad m \neq n \quad (5)$$

$$P(A_m, \theta_n)=P(A_m)P(\theta_n) \quad (6)$$

根据以上原则, 调制方式可分为相位调制、振幅调制和混合调制, 各种调制方式又可采用不同的随机分布, 对各种组合进行仿真验证, 可比较得出其性能优劣^[9]。对于 DMD 反射镜阵列来说, 上述的振幅调制和相位调制, 最终体现为对光场的强度调制 $I=|E^*E|$ 。利用公式(1)可求得各种调制方式产生赝热光场的二阶关联函数, 如表 1 所示。

表 1 不同调制方式二阶关联函数峰值对比表

Tab.1 Peak value correlation table of 2nd correlation function with different modulation method

Phase	Amplitude			
	Posson ($\lambda=0.5$)	Rayleigh ($\sigma=0.3$)	Uniform ($a=0, b=1$)	Fixed value (1)
Posson ($\lambda=0.5$)	1.827 9	1.968 3	1.903 8	1.710 9
Rayleigh ($\sigma=0.3$)	1.907 4	1.952 9	1.924 6	1.578 8
Uniform ($a=-\pi, b=\pi$)	1.900 1	2.051 8	2.013 0	1.742 7
Fixed value (0)	1.517 9	1.967 0	1.979 7	-

赝热光源二阶关联峰值高的性能较优, 在峰值相近时, 次峰值小的性能较优。分析可得采用幅度调制服从瑞利分布、相位调制服从均匀分布的调制方式, 具有最高的关联峰值, 且次峰值低, 因此性能最优。该方式产生的赝热光场二阶关联函数如图 2 所示。

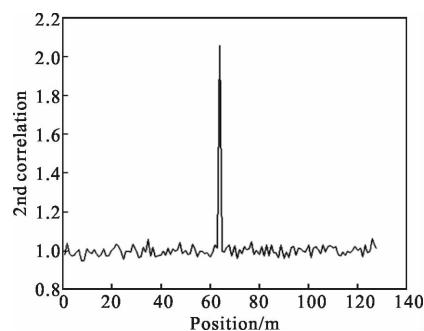


图 2 DMD 模拟赝热光场的二阶关联函数

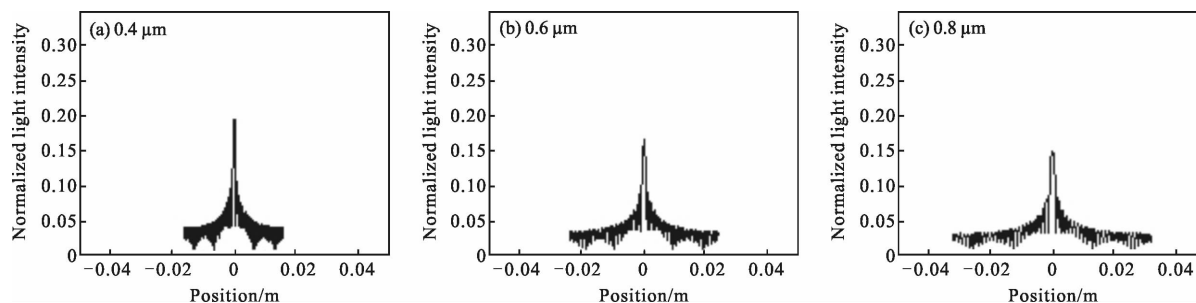
Fig.2 2nd correlation function of simulated pseudothermal light field by DMD

2.2 衍射对图像对比度的影响

DMD 阵元尺寸一般在 $10 \mu\text{m}$ 量级, 在利用 DMD 对不同波长进行调制时, 需要考虑衍射对调制质量的影响^[9]。假设 DMD 阵元尺寸为 $10.8 \mu\text{m}$, 光源波长范围 $0.2\sim 10 \mu\text{m}$, 经 DMD 调制后, 在自由空间传播 0.0175m 进入投影光学系统。根据夫琅和费近似条件, $\frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2 \times (10.8 \times 10^{-6})^2}{0.2 \times 10^{-6}} = 0.0012 \text{m}$ 远小于 0.0175m , 满足近似条件。以单个阵元翻转的情况为例考虑衍射影响, 该阵元产生的夫琅和费衍射强度分布图样为:

$$I(x, y) = \frac{A^2}{\lambda^2 z^2} \text{sinc}^2\left(\frac{2w_x x}{\lambda z}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{2w_y y}{\lambda z}\right) \quad (7)$$

式中: w_x, w_y 为阵元半宽度。在不同波长下得到衍射图样截面曲线如图 3 所示。可见, 在可见光波段, 衍射现象较弱, 对输出图像对比度的影响较小; 在近红外波段, 衍射现象逐渐显著, 能量向旁瓣转移严重, 对对比度的影响较大; 可知波长选择在可见光波段效果较好。



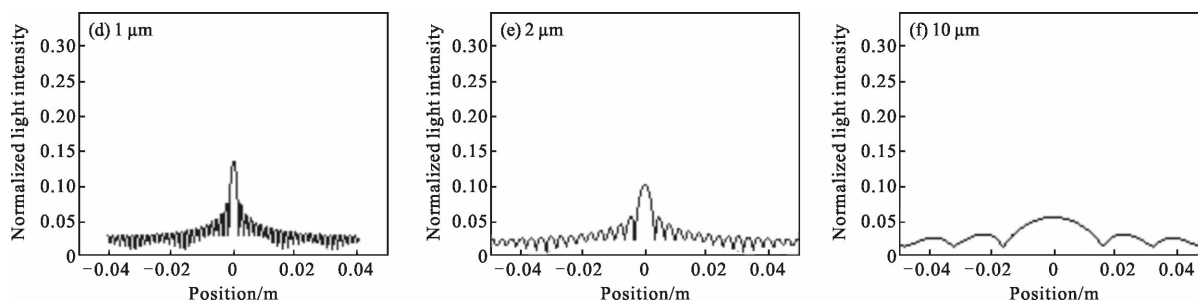


图 3 衍射光斑截面强度分布曲线

Fig.3 Strehl distribution curve of diffraction spot cross section

2.3 DMD 调制噪声对探测的影响

DMD 通过微反射镜翻转实现对光的亮暗控制, 进而通过二进制脉宽调制实现灰度显示。以 DMD 显示 8 bit 灰度为例, 一个调制周期分 8 段, 每段时长依次减半; 周期内占空比不同, 由于积分效应就可产生不同灰度。

实现关联成像需要对 DMD 进行随机调制。如果探测器积分时间与调制周期相近, 由于调制信号自身的随机性, 以及积分时间与调制周期的不匹配, 会产生信号噪声; 如采用硬件同步, 可减小不匹配引起的噪声, 但积分时间内随机信号引起的噪声仍存在。假设调制位数为 8 bit, 平均灰度为 A 、频率为 ω , 起伏灰度为 1 的正弦信号, 取 M 个点。

$$T_i = A + \sin(\omega x_i) \quad i=1, 2, 3, \dots, M \quad (8)$$

按照 DMD 调制显示时序, 将其转换为一个长度为 $N=255 \times M$ 二值序列 $B_i, i=1, 2, 3, \dots, N$ 。则 DMD 调制时间周期为 $T_M=2\pi/\omega$, 最小时间间隔为 $\Delta t=T_M/255$ 。

假设探测器的积分时间为 T , 则积分时间内 DMD 调制的二值序列点数为 $\Delta N=T/\Delta t$, 共探测得 K 个点。假设探测器从一随机时刻 rand 开始积分, 则其积分区间可表示为 $[1+\text{rand}, \Delta N+\text{rand}]$, 在第 k 个积分区间内探测器探得的信号为:

$$Y_k = \sum_i B_{ki} \quad i \in [1+\text{rand}, \Delta N+\text{rand}] \quad (9)$$

将 Y 进行一定比例变换后, 与原始数字序列 T 比较, 并求得其平均误差信号:

$$E_i = \frac{|f(Y_i) - T_i|}{M} \quad i=0, 1, 2, 3, \dots, M \quad (10)$$

根据以上分析, 取积分时间 T 处于 0~200 ms, 平均灰度 $A=128$, 频率 $\omega=25$, 点数 $M=200$, rand 为在 $[0, T_M]$ 时间范围内服从均匀分布的时刻, 代入仿真可得调制噪声起伏与积分时间的关系如图 4 所示。总体上, 调制噪声随积分时间增加下降; 在积分时间

小于 8 ms 时, 噪声超过信号本身幅度, 由此恢复的信号完全失真; 在积分时间增加至 40 ms 时, 噪声灰度已下降到 0.1, 基本不会对信号的探测与恢复产生影响, 以此可以作为探测器积分时间设定的参考。

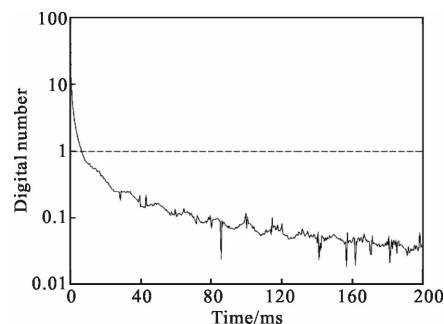


图 4 调制噪声随积分时间的变化

Fig.4 Modulation noise changes with integration time

2.4 图像解算方式比较

进行图像解算, 主要的评估指标是解算出图像的信噪比。常用的二阶关联算法得出图像的信噪比较差且与采样次数存在较强的关联。在以较少的采样数获得高成像质量方面, 压缩感知算法较有优势。根据 2.2 小节的理论分析, 进行压缩感知算法分析。假设 DMD 的阵元数为 $m \times n$, 则赝热光场与目标相互作用后, 光场第 k 个单元可写为:

$$d_k = \sum_{y=1}^m \sum_{x=1}^n I_k(x, y) T(x, y) \quad (11)$$

为了将上式写成矩阵相乘的形式, 将 DMD 的预置函数 $I(x, y)$ 按列优先顺序向量化, 转换为一个 $L=m \times n$ 的行向量 φ_k , 即:

$$\varphi_k = [I_k(1, 1), I_k(2, 1), \dots, I_k(m, 1), \dots, I_k(m, n)] \quad (12)$$

将 p 次探测得到的 p 个 φ_k 排成一个 $p \times L$ 的矩阵 Φ , 并将 p 个 d_k 排成一列 D , 则测量过程可表示为:

$$D = \Phi T \quad (13)$$

其中

$$\Phi=[\varphi_1; \varphi_2; \cdots; \varphi_p] \quad (14)$$

$$T=[T(1, 1), \cdots, T(m, 1), \cdots, T(m, n)] \quad (15)$$

$$D=[d_1; d_2; \cdots; d_p] \quad (16)$$

因各次探测是非相关的, 所以当 $p \geq L$ 时, 公式(13)为超定方程, 可得到最小平方准则下的解; 当 $p < L$ 时, 为欠定方程, 只能根据压缩感知理论通过稀疏重建获得稀疏约束下的解^[11-12]。

为验证算法的有效性, 利用字符图像进行仿真。以二阶关联算法采样数为基准, 在其基础上减少采样数进行压缩感知并对比效果; 解算得出图像如图5所示。可见尽管采样数降低为 1/16, 但基于压缩感知的解算效果要优于二阶关联算法。



(a) 参考采样数 (b) 采样数 1/16

(a) Reference sampling number (b) 1/16 sampling number

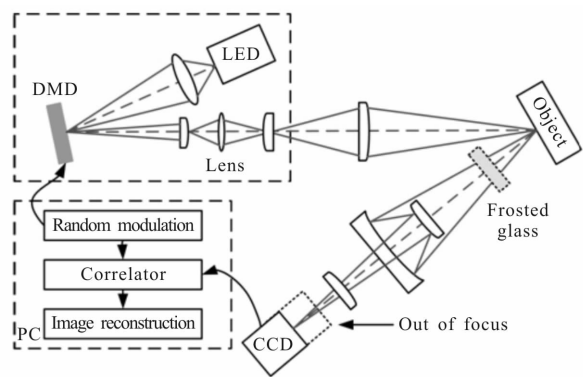
图 5 二阶关联测量和压缩感知解算效果对比

Fig.5 Comparison of reconstruction results with 2nd correlation measurement and compressed sensing

3 实验设计及结果分析

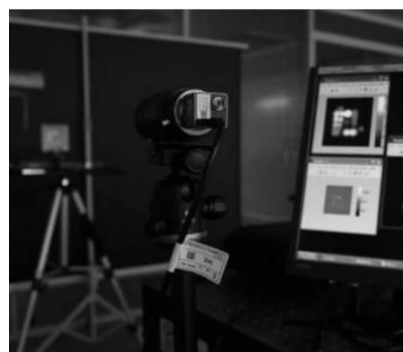
3.1 实验系统构建

设计多波长关联成像实验系统, 如图 6(a)所示。



(a) 系统框图

(a) System block diagram



(b) 实验装置

(b) Experimental setup

图 6 多波长关联成像实验系统

Fig.6 Multi-wavelength correlated imaging experimental system

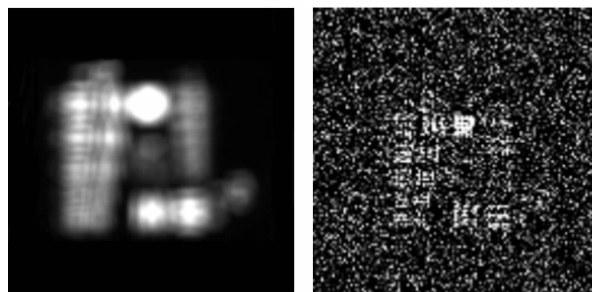
光源和 DMD 采用 TI 公司的 RGB LED 光源引擎组件和 Discovery 4100 DMD 开发套件; 发射光学系统选用 Nikon ED f180mm 镜头; 接收光学系统选用 Computar 公司的 HG5Z2518FC-MP 镜头; CCD 相机选用大恒图像的 MER-040-60UM; 系统控制及信号处理使用计算机完成, 实验系统外观如图 6(b)所示。

3.2 成像实验

实验系统构建完成后, 按照第 3 节仿真分析结果设定参数, 进行成像实验验证, 主要包括特殊场景下分辨率测试, 以及多波长成像, 同时对比压缩感知算法与二阶关联算法解算图像的质量。

3.2.1 分辨率测试

测试采用 USAF1951 标准分辨率测试板。首先在测试板经过传统成像系统投影到图中 CCD 时, 传统成像系统离焦情况下进行成像对比。此时传统成像系统的成像结果如图 7(a)所示, 可见, 所成图像模糊, 已无法分辨短线组; 而关联成像可实现对靶标细节的分辨, 如图 7(b)所示。



(a) 传统成像结果

(b) 关联成像结果

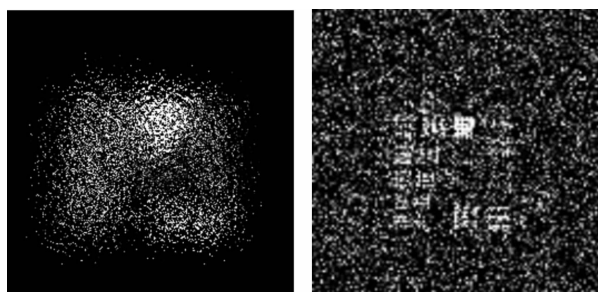
(a) Classical imaging result

(b) Correlate imaging result

图 7 离焦成像实验

Fig.7 Imaging experiment in defocused case

其次进行存在散射介质时成像对比。在探测光路中加入毛玻璃进行散射。此时传统成像的成像结果如图 8(a)所示,可见受散射影响,图像失去细节分辨能力。而关联成像仍可实现对靶标细节的分辨。



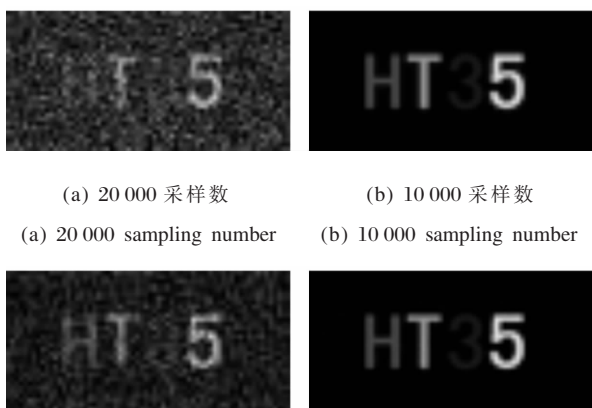
(a) 传统成像结果 (b) 关联成像结果
(a) Classical imaging result (b) Correlated imaging result

图 8 散射成像

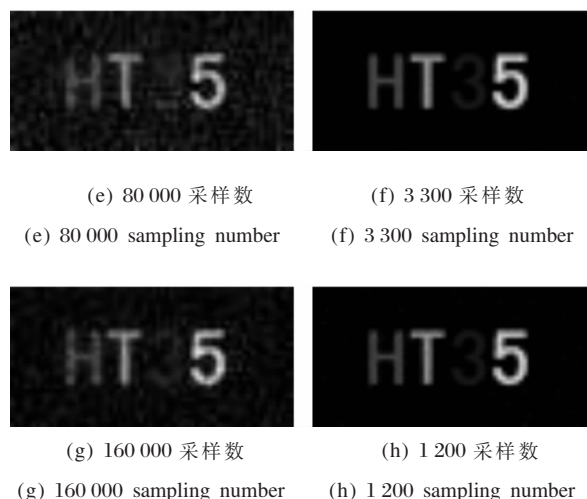
Fig.8 Experimental in scattering imaging

3.2.2 多波长成像

对彩色靶标图案进行成像。通过控制 LED 驱动组件和 DMD 组件,依次投射中心波长为 457、545、610 nm 的光进行成像,采样次数 20 000 次,二阶关联解算得出图像如图 9(a)所示。可见以 20 000 次的采样所成图像质量较差;进而以 2、4、8 倍的采样次数进行解算,得出图像如图 9(c)、(e)、(g)所示。利用压缩感知算法进行处理解算。以 20 000 为基准采样次数,压缩感知算法分别在 2、4、6、8 倍降采样次数下进行解算,得出图像如图 9(b)、(d)、(f)、(h)所示。可见,压缩感知算法以 8 倍的降采样次数得出的图像,质量仍高于二阶关联算法以 8 倍采样次数得出的图像。



(a) 20 000 采样数 (b) 10 000 采样数
(a) 20 000 sampling number (b) 10 000 sampling number
(c) 40 000 采样数 (d) 5 000 采样数
(c) 40 000 sampling number (d) 5 000 sampling number



(e) 80 000 采样数 (f) 3 300 采样数
(e) 80 000 sampling number (f) 3 300 sampling number
(g) 160 000 采样数 (h) 1 200 采样数
(g) 160 000 sampling number (h) 1 200 sampling number

图 9 多波长成像解算方法对比

Fig.9 Comparison of multi-wavelength imaging reconstruction method

4 结论

综上所述,结合 DMD 调制与压缩感知的方法,设计多波长关联成像系统,对其在实际应用过程中面临的几个关键问题进行仿真分析,并设计实验系统完成验证。实验证明,该方法可以获取高质量的成像结果,具备实用价值;同时验证了该系统具有一系列有别于传统成像技术的特点:能有效降低环境干扰,获得清晰的图像;可获取目标光谱信息;同时系统光路简洁,可靠性高,易于小型化,可搭载于多种平台,应用于空间探测、军事侦察、光学制导、土地资源监测等领域,具有广阔的发展前景^[13-14]。

参考文献:

- [1] D'angelo M, Shih Y H. Quantum imaging [J]. *Laser Physics Letters*, 2005, 2(12): 567-596.
- [2] Zhang Tianran, Meng Zhaokui, Sun Mingjie. Ghost imaging with pure phase object [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3105-3109. (in Chinese)
张天然, 孟照魁, 孙鸣捷. 纯相位物体的鬼成像[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(9): 3105-3109.
- [3] Chen Tao, Li Zhengwei, Wang Jianli, et al. Imaging system of single pixel camera based on compressed sensing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2523-2530. (in Chinese)
陈涛, 李正炜, 王建立, 等. 应用压缩传感理论的单像素相机成像系统[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2523-2530.
- [4] Yaron Bromberg, Ori Katz, Yaron Silberberg. Ghost imaging

- with a single detector[J]. *Phys Rev A*, 2009, 79(5): 053840.
- [5] Lu Minghai, Shen Xia, Han Shensheng. Ghost imaging via compressive sampling based on digital micromirror device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 98–103. (in Chinese)
陆明海, 沈夏, 韩申生. 基于数字微镜器件的压缩感知关联成像研究[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 98–103.
- [6] Jeffrey H. Shapiro. Computational ghost imaging [J]. *Phys Rev A*, 2008, 78(6): 061802.
- [7] Candes E, Wakin M B. An Introduction to Compressive Sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 14–20.
- [8] Zhang Minghui, Wei Qing, Shen Xia, et al. Statistical optics based numerical modeling of ghost imaging and its experimental approval[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(10): 1858–1866. (in Chinese)
张明辉, 魏青, 沈夏, 等. 基于统计光学的无透镜鬼成像数值模拟与实验验证[J]. 光学学报, 2007, 27(10): 1858–1866.
- [9] Fan Xiaolei, Zhang Erfeng, Xu Yaokun, et al. Comparison of pseudo-thermal light source based on different method of modulation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(4): 041101. (in Chinese)
范晓磊, 张二峰, 徐耀坤, 等. 基于不同调制方法产生赝热光源的性能比较 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 041101.
- [10] He Yongqiang, Tang Deshuai, Wang Long, et al. Diffractive characteristics of DMD and its applications in infrared scene simulation[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(8): 935–938. (in Chinese)
何永强, 唐德帅, 王龙, 等. DMD 衍射特性及其在红外场景仿真中的应用[J]. 激光与红外, 2013, 43(8): 935–938.
- [11] Han Shensheng, Gong Wenlin, Chen Mingliang, et al. Research progress of GISC lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2547–2555. (in Chinese)
韩申生, 龚文林, 陈明亮, 等. 基于稀疏和冗余表象的鬼成像雷达研究进展[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2547–2555.
- [12] Guo Shuxu, Zhang Chi, Cao Junsheng, et al. Object reconstruction by compressive sensing based normalized ghost imaging [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 288–294. (in Chinese)
郭树旭, 张驰, 曹军胜, 等. 基于压缩感知归一化关联成像实现目标重构[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 288–294.
- [13] Gong Dun. Review on mapping space remote sensor optical system[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 714–724 (in Chinese)
巩盾. 空间遥感测绘光学系统研究综述 [J]. 中国光学, 2015, 8(5): 714–724.
- [14] Lv Shiliang, Liu Jinguo, Wang Xiaoqian. Design of refocusing system for a high resolution TDICCD earth observation camera [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 1013–1019. (in Chinese)
吕世良, 刘金国, 王晓茜. 对地观测高分辨率 TDICCD 相机调焦控制系统设计[J]. 中国光学, 2015, 8(6): 1013–1019.