

基于压缩感知的偏振光成像技术研究

王 朋^{1,2}, 荣志斌³, 何俊华¹, 吕 沛¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国人民解放军 91550 部队, 辽宁 大连 116023)

摘要: 偏振成像技术是一种基于目标自身辐射或反射信号中所包含的偏振信息获取物体图像的方法, 尤其在人工目标的探测和表面识别方面, 相对光强度探测方式具有独特的优势。针对传统的偏振成像技术在复杂的成像环境中成像距离短和成像质量差的缺点, 提出了一种基于压缩感知的新型偏振光成像技术。阐述了压缩感知理论的基本原理, 构造了合适的采样矩阵和重构算法, 设计了具体的成像系统, 并通过压缩感知偏振成像实验证明了该成像技术的可行性。空气中实验结果表明, 该成像系统能够重构出预先放置目标靶的偏振图像。此外在现有的实验条件基础上讨论并提出了几种改进系统成像质量的措施。

关键词: 偏振成像技术; 压缩感知理论; 采样矩阵; 重构算法

中图分类号: P715.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0228005

Polarization imaging based on compressed sensing theory

Wang Peng^{1,2}, Rong Zhibin³, He Junhua¹, Lv Pei¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academic of Sciences, Beijing 100049, China;

3. The Chinese People's Liberation Army 91550 Troops, Dalian 116023, China)

Abstract: Polarization imaging technology is a method that acquires the object images by collecting the polarization information of the target radiation or reflected signals. In particular, compared with the light intensity detection, it has unique advantages in the artificial target detection and surface recognition. Due to the short range and low quality of the conventional polarization imaging in complex imaging environment, a new kind of polarization imaging technology based on compressed sensing was proposed. The basic principle of compressed sensing theory was elaborated. By constructing reasonable sampling matrix and reconstruction algorithm, the specific imaging system was designed. Besides, the feasibility of this technology was confirmed through the imaging experiment. The study results in the air show the system can reconstruct the polarization images of the pre-positioned target. Additionally, in the existing experimental conditions, some measures are investigated and proposed to improve the system imaging performance.

Key words: polarization imaging technology; compressed sensing theory; sampling matrix; reconstruction algorithm

收稿日期: 2015-06-08; 修订日期: 2015-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(61405244); 中国科学院西部之光重点项目(Y329591213)

作者简介: 王朋(1989-), 男, 硕士生, 主要从事光电成像方面的研究。Email: wangpengkks@163.com

导师简介: 何俊华(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事水下光电成像、强激光参数诊断方面的研究。Email: hejunhua@op.ac.cn

0 引言

偏振成像技术^[1]通过接收光与物质相互作用产生的散射光信号,获取反映目标特征的偏振信息,最终得到目标图像。偏振信息中不仅包含物体的轮廓信息,还包含物体的材质、表面粗糙度、湿度等特性。在目标反射信号与背景信号光强相差不大时,采用偏振成像相对于光强成像能更有效地探测和识别目标。偏振成像技术作为一种新的信息分析方式,相对于传统方法存在很多优点,因此被广泛应用于军用、遥感、海洋开发、生物医学以及工业领域等^[2-5]。

目前的偏振成像技术分为被动式偏振成像技术和主动式偏振成像技术两类。被动式偏振成像技术一般以自然光或目标热辐射为光源,受外界环境影响较大,典型的应用有红外偏振成像技术。主动式偏振成像技术^[6]一般采用激光或 LED 作为照明光源,其中以激光照明应用最广泛。光源发出的偏振光照射在目标物体上面,目标反射的信号光被 CCD (CMOS)接收,从而得到目标偏振图像,其成像系统的基本结构如图 1 所示。

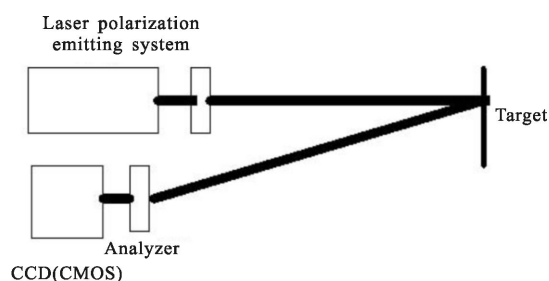


图 1 传统的激光探测成像系统

Fig.1 Structure of traditional laser detecting and imaging system

传统偏振成像系统探测远距离目标时,接收器件 CCD(CMOS)的灵敏度成为限制成像距离的主要因素。CCD(CMOS)相机对单个像素采样,获取单个像元的光能量。当像元的光能量下降到相机接收阈值以下时,接收器就无法正常工作。阈值大小由 CCD(CMOS)的灵敏度决定,因此传统的偏振成像中,CCD(CMOS)灵敏度制约了极限成像距离的提高。另外,成像光束在一些高散射介质(雾、雨和水等)中传播时会产生大量的散射光。在这样的成像环境中,积分时间内,CCD(CMOS)接收到的信号不仅包含目标反射信号,而且包含大量散射光信号,造成接收信

号的信噪比降低,影响图像质量。虽然利用偏振效应能够消除一部分散射杂光,提高信号信噪比,但提高程度非常有限。

传统的激光主动式偏振成像方法获得目标图像的质量受到 CCD(CMOS)性能限制,而选择高性能 CCD(CMOS)又使系统成本呈几何倍数增加,成像性能却没有显著改善。文中提出的基于压缩感知的偏振光成像方法相对于传统偏振光成像不采用 CCD (CMOS)作为探测器,采用 DMD 及光电倍增管接收光强信号,利用重构算法对采样值进行重构恢复获得目标偏振信息图像,图像的分辨率由 DMD 微镜数目决定。

相对于传统偏振光成像中 CCD(CMOS)对单个像素采样,基于压缩感知偏振成像的采样值由采样矩阵决定。采样值并非单一像素能量,而是数千甚至数万个像素的光能量总和。当两种方式的采样值相同时,后者所得到的单个像素的光能量要低得多,这样就间接提高了极限成像距离。压缩感知偏振成像技术的信号采集系统由光电倍增管和高速数据采集卡组成,在单次采样过程中,对脉冲回波信号全程接收情况下,接收到的就是一列时间序列的回波信号,如图 2 所示。

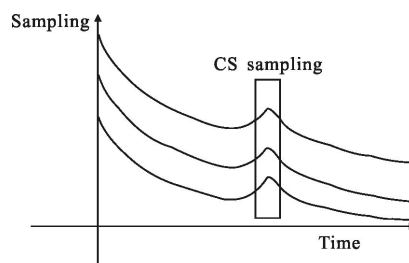


图 2 采样提取示意图

Fig.2 Method of sampling

将目标信号从时间序列的回波信号中提取出来,得到采样信号的值。这样,一方面能够实现“距离选通”的功能,即可以只把与目标对应的时间段内的信号提取出来作为采样信号;另一方面根据目标信号前面的散射光信号变化趋势,拟合出没有目标时的散射光信号曲线,从而得到目标对应位置处的散射光信号强度,从采样值中减去对应位置处散射光信号,能进一步提高采样信号信噪比。基于压缩感知偏振光成像技术同时具有偏振成像技术和距离选通成像技术的优点。

文中对压缩感知偏振成像技术进行了研究,设计了成像系统的采样矩阵和重构算法,通过具体的成像实验证明了该成像技术的可行性,分析了影响系统成像质量的因素,并提出几种改善成像性能的措施。

1 压缩感知理论

压缩感知理论^[7]指出如果信号本身是稀疏的或在某个变换基下是稀疏的,那么就可以找出一个与变换基满足约束等距性(RIP)的观测矩阵,将高维度原始信号投影到低维空间上,然后将低维空间上得到的少量测量值求解一个非线性优化问题,就可以高概率重构原始信号。压缩感知理论主要包括信号的稀疏表示^[7]、测量矩阵^[8-9]和信号重构算法^[10-11]三个重要的内容。

压缩感知成像原理的数学表述如下:如果信号 X 在某个正交基 Ψ 上是稀疏的或可压缩的,那么可以求出变换系数 $\Theta = \Psi^T X$, Θ 是信号 X 在 Ψ 下的等价或逼近的稀疏表示,找到一个平稳的满足 RIP 性质或相关条件的 $M \times N$ 维的测量矩阵 Φ ,对系数向量 Θ 进行测量得到观测集合 $y = \Phi \Theta = \Phi \Psi^T X$,最后通过求解有约束的 l_1 -范数下的最优化问题得到信号 X 的精确或近似逼近 \hat{X} 。

$$\min \|\Psi^T X\|_1 \quad \text{s.t. } y = \Phi \Theta = \Phi \Psi^T X \quad (1)$$

式中: l_1 在现有的研究情况下可以取 0, 1, 2。

压缩感知的前提是信号满足稀疏性或可压缩性,对于文中的成像目标来说,目标是空气中的自然图像信号,就目前所知,自然图像信号均是光滑或分段光滑的,Mallat 证明了光滑信号和分段光滑信号都是满足稀疏性^[12],这就为目标的压缩感知采样提供了坚实的理论基础。

压缩感知信号采样过程是将信号采样和压缩过程结合在一起,采样过程即是压缩的过程,这种“边采样,边压缩”的采样方式相对于传统的先采样,后压缩的方式将信号处理的技术负担从传感器转到数据处理上,极大地降低了系统对传感器的要求。压缩感知信号采样模式相对于传统的信号采样模式具有高效地处理采样数据并节省存储和传输成本的优点,使得压缩感知理论成为近年来国际上的热门研究方向。在分布式传感器网络^[13]、雷达遥感^[14]、医学图像处理^[15]、图像的超分辨率重构^[16]、图像/视频的压缩编码^[17]等诸多

领域对压缩感知理论展开了广泛的应用研究。

2 采样矩阵和重构算法的设计

采样矩阵的设计与 DMD 调制紧密相关。由于实验系统采用脉冲式激光光源,激光器发出一个脉冲到光电倍增管接收到信号的时间极短,在这段时间内 DMD 所有微镜都可以认为是静止的,每一个微镜偏转角度只有两种情况, $+12^\circ$ 和 -12° 。测量矩阵的元素要符合 DMD 中这种微镜状态的调制,所以选择元素为两个不同整数的分块的 Hadamard 结构矩阵——SBHE(Scrambled Block Hadamard Ensemble)采样矩阵。其元素取值为 +1 和 -1,通过部分 Hadamard 集通过随机列置得到,产生简单,计算复杂度较低,并且与常用的多数固定稀疏基不相关的概率很高。

SBHE 矩阵中 +1 表示 DMD 相应位置处的反射信号被汇聚到光电倍增管接收, -1 表示反射信号汇聚进入暗室吸收处理。SBHE 矩阵获得的采样值 y_i 是一次采样过程中光电倍增管接收的能量与暗室吸收的能量的差值。

$$y_i = y_i(+1) - y_i(-1) \quad (2)$$

式中: $y_i(+1)$ 为光电倍增管接收的光能量; $y_i(-1)$ 为暗室吸收的光能量。通过光电倍增管能得到 $y_i(+1)$ 的值,根据反射信号的总能量为 $y_i(+1)$ 和 $y_i(-1)$ 的和,为定值,因此可以得到采样值的表达式:

$$y_i(-1) = 2y_i(+1) - y_z \quad (3)$$

式中: y_z 表示采样过程中目标反射的总能量,在采样时间内认为该值为常数。在实际采样过程中,首先采用元素全部为 +1 的采样矩阵对反射信号采样,得到采样值 y_z ,然后根据提前设置的 SBHE 矩阵对信号进行采样,得到中间采样值 $y_i(+1)$;利用 y_z 和 $y_i(+1)$ 得到最终采样值 y_i 。

利用重构算法求解约束优化问题,得到目标图像完成图像重构,其数字表达式如公式(4)所示:

$$\min_{\theta} \|\Phi X\|_1; \quad \text{s.t. } y = \Phi X = \Phi \psi \theta \quad (4)$$

式中: y 为采样集合; Φ 为测量矩阵。在设计重构算法时,应以准确重构目标图像为首要因素,然后在保证精度的条件下减少图像重构时间,减小计算复杂度等次要因素。目前提出的几种算法类型主要有:贪婪类算法、线性规划算法、迭代阈值算法以及组合类算法等。在常见的重构算法中,凸松弛类算法最满

足该系统对重构算法的要求,其中凸集交替投影算法(POCS)既能保证目标图像重构的精度,又较为简单,复杂度较低,适用于文中所设计的压缩感知偏振成像方案。它的主要思想是通过构建两个凸集,然后在这两个凸集上交替投影,最后以两个凸集的交点作为优化问题的解。两个凸集为 l_1 球面 B 和超平面 H :

$$B = \{\theta: \|\theta\|_1 \leq \|\beta\|_1\} \quad (5)$$

$$H = \{\theta: \Phi\psi\theta = \Phi X = y\} \quad (6)$$

算法从 B 外的一点出发,交替地在 H 上进行投影,然后在 B 上投影,这种方法能够保证算法收敛于 $B \cap H$ 中的一点,则 θ 为:

在 H 上投影,对于任意的 X ,在 H 上找到最近的解。

$$\rho(H, y, \Phi) = X + \Phi^T (\Phi\Phi^T)^{-1} (y - \Phi X) \quad (7)$$

在 B 上投影:去除重构过程中产生的高斯噪声,采用硬阈值方法。

$$\hat{\theta}(t) = \begin{cases} \theta = \Psi^T X & \\ \theta(t), & |\theta(t)| > \eta \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (8)$$

文中是在 POCS 算法基础上设计编写重构程序,构建目标图像的重构算法。

3 实验

实验系统整体成像方案如图 3 所示。照明光源为 532 nm 脉冲式激光器,输出水平方向偏振光。激光器前面安装激光扩束镜头,调整激光器出射光束直径和发散角。光电倍增管和暗室分别固定在 DMD 模块两侧,光电倍增管的接收面与 DMD 反射光的方向垂直,并在前面加检偏器,接收偏振信号。

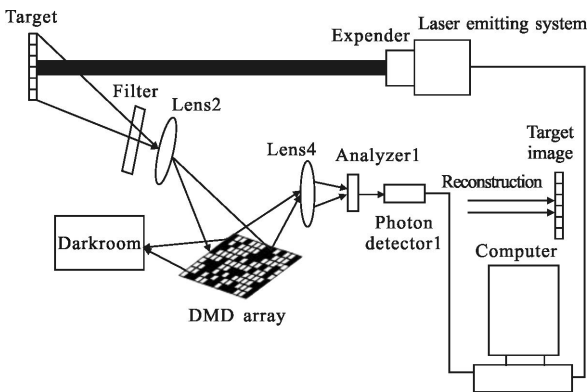


图 3 实验装置原理图

Fig.3 Schematic of experimental equipment

系统工作时,DMD 采样控制软件中载入一定数

量的采样矩阵(170×150),具体的采样图样如图 4(a)和(b)所示。采样矩阵改变的同时,控制系统给激光器提供一个外部触发信号,激光器输出一个光脉冲。激光器发出脉冲的能量由激光器外置输出电路控制。采样信号由光电倍增管接收,经过 A/D 转换后以数字信号的形式被记录下来。

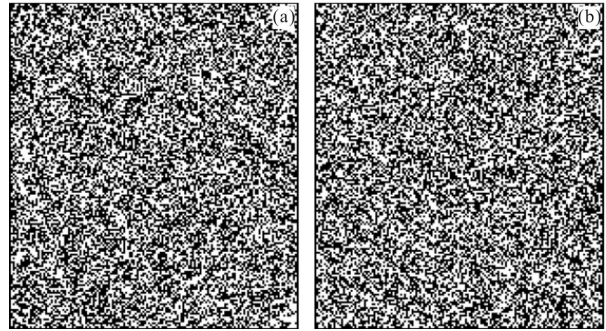


图 4 采样矩阵图样

Fig.4 Sampling matrix pattern

实验采用的光电倍增管采样周期为 1 ns,在对脉冲回波信号全程接收情况下,成像过程中的采样数据如图 5 所示。将采样数据处理之后代入重构算法即可重构出相应距离的目标图像。

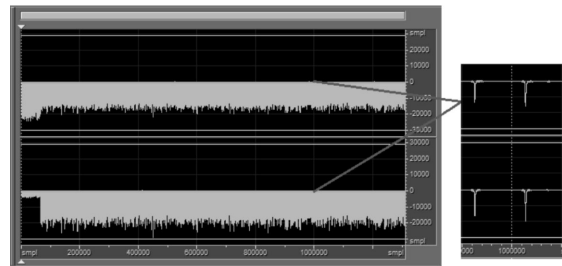


图 5 采样数据

Fig.5 Sampled data

选择涂有黑漆图样的白色硬纸板作为成像的目标靶,如图 6 所示。

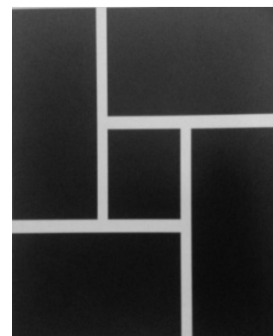


图 6 目标靶图像

Fig.6 Picture of the target

在室内无光环境下进行成像实验，激光器输出控制电压稳定在 4.2 V，目标物距 1 950 mm，获取目标靶水平方向和竖直方向的偏振图像如图 7(a)、(b)。图 8(a)~(f)为对应灰度直方图。

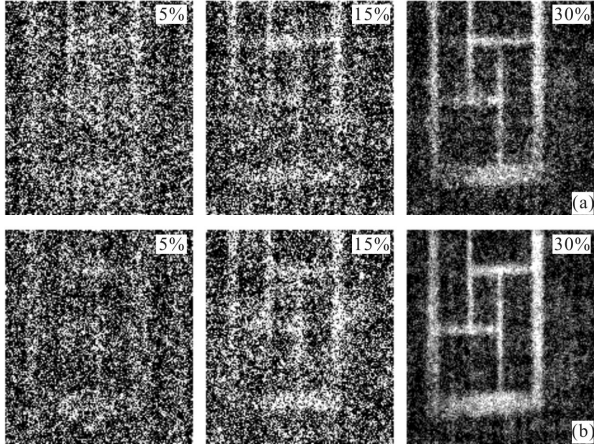


图 7 成像实验结果

Fig.7 Results of imaging experiment

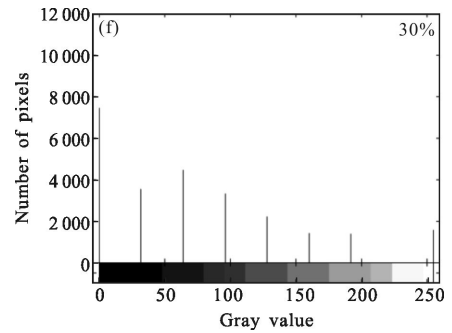
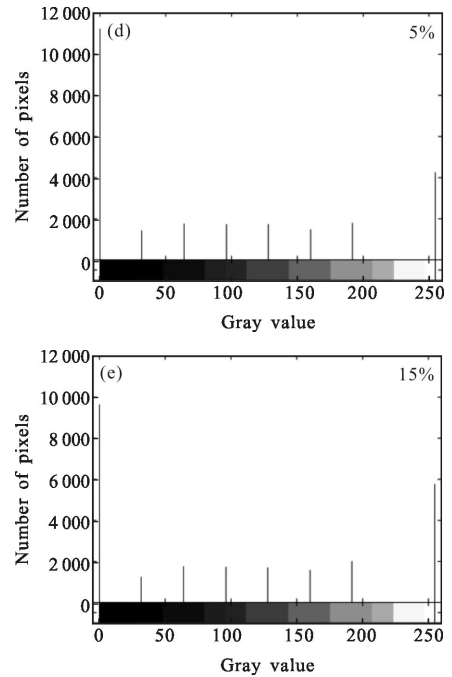
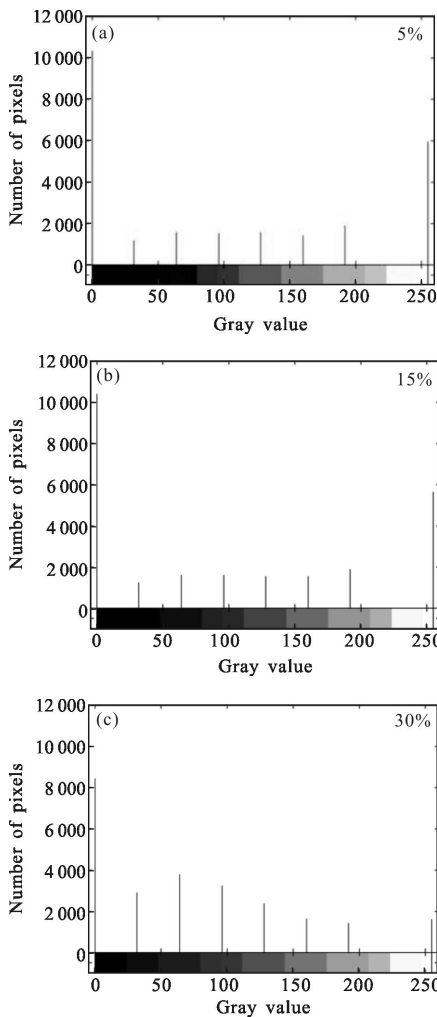


图 8 目标图像像素灰度分布

Fig.8 Grey scale histogram of target

图 7 表示在水平和竖直两个方向上采样率分别为 5%、15%、30%时得到的 6 幅目标偏振图像。这里的采样率指的是采样点数与像元总数的比值，采样点数是进行一次图像重构(得到一幅图像)所利用的采样值的个数。目标图像的像元总数为 $N=170 \times 150=25\ 500$ ，因此采样率分别为 5%、15%、30%时，对应的采样点数分别为 1 208、3 804、7 860。

图 8 是水平和竖直方向上采样率分别为 5%、15%、30%时目标偏振图像对应的灰度分布，从灰度分布中可以看出，目标图像的灰度值分布是离散的，除去 0 和 255 灰度值以外，所有像素灰度值均为 32 的整数倍。

随着采样率上升，重构图像使用的采样点数增加，目标图像质量变得越好。在采样率为 5%时，利用 1 028 个采样值重构目标图像，由于重构计算的采样

值个数远小于像元总数,重构的图像效果很差,几乎无法识别。当采样率增加到 15%时,此时得到的图像在主观清晰度优于采样率为 5%时的目标图像,重构的图像已可以看出目标的轮廓,但图像噪声仍然很严重。采样率达到 30%,此时图像噪声已有很大程度的改善,重构的图像不仅能清楚地看到目标的轮廓,而且目标中的一些细节部分也能够清楚地分辨出来。可以看出:压缩感知偏振成像技术利用 30%的采样点重构出的图像就能与传统偏振成像全部采样得到的图像同样实现目标识别的目的,说明压缩感知偏振成像技术是切实可行的。

通过对不同采样率重构图像的灰度值分布的研究,发现不同的灰度分布也可以构成一幅目标图像,完整的图像可以看成所有离散的灰度图像的叠加,并且每一个灰度图像质量的好坏都影响整体图像质量,其中两端灰度值的像素分布尤为重要。随着采样率的增加,目标图像中 0 灰度值像素个数和 255 灰度值像素个数下降,二者之间的各个灰度值像素个数增加,各个离散的灰度值分布图像质量反而更好,整体图像质量也越好。

成像实验系统主要由光源、接收器和重构算法三部分组成,这三个部分中都存在影响系统成像性能的因素,具体地说,即激光器输出脉冲稳定性,光电倍增管的动态线性响应和重构算法。

实验中采用的激光器输出脉冲能量不稳定,从图 5 可以看出:高速采集卡采集的脉冲能量差异较大,也就是说脉冲能量产生了漂移,最大漂移量达到 40%,严重影响采样值的精确度,降低成像质量。

在理想情况下,光电倍增管的光电特性曲线如图 9 所示。

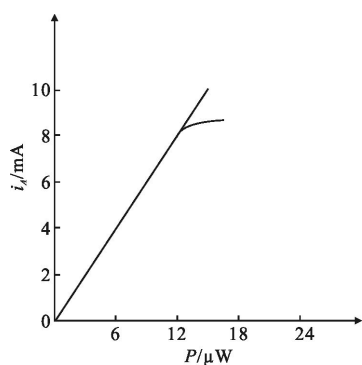


图 9 光电倍增管光电特性曲线

Fig.9 Curve of photoelectric conversion characteristic of PMT

它在相当宽的范围内保持线性关系,当光功率接近或超过饱和阈值时,特性曲线呈现非线性变化。光电倍增管在实际使用过程中由于受到外部和内部各种干扰因素影响,其实际线性区间缩小。同时系统工作时,由于激光器的脉冲能量漂移,一部分采样数据处于非线性区域,此时采集到的脉冲能量值大小无法与实际的脉冲能量大小呈线性关系对应起来,采样值无法反映真实值,以这样的采样值重构出来的目标图像与实际图像会有一定的差异。

重构算法是获取目标图像的最终步骤,通过重构算法,将携带有目标信息的采样值转化为目标图像。重构算法有多种多样,每一种重构算法都有自身的优缺点。凸松弛类算法重构所需的采样值数量最少,计算精度高,但同时它的计算复杂度高,运算量大。贪婪类算法的计算时间短,但这是以降低重构精度为代价。组合算法对稀疏要求较高,只能针对特定的情况,不具有普适性。重构算法的选取是否合理直接关系重构图像的质量,应该根据具体的应用环境综合考虑。

因此,改善系统性能,提高成像质量应该从光源、接收器和重构算法三个方面着手。选择脉冲能量输出稳定的激光器,使每一个采样值对应脉冲能量大小尽可能相等。采用性能更好的光电倍增管,采取屏蔽措施减少干扰源,提高采样值准确性。构建更加合适的重构算法,在满足采样量、采样时间、计算复杂度等最低要求条件下,尽可能地提高算法的精度。

5 结 论

由于偏振光成像相对于光强度成像的诸多优点,偏振光成像的用途愈加广泛。但是在一些复杂的成像环境下,传统的偏振成像技术在成像距离和成像质量方面却无法取得理想的成像效果。压缩感知采样技术在高散射介质(如水、雨、雾、霭等)中具有很大的优势,例如,自然界水体属于高散射介质,在水下成像过程中,压缩感知偏振成像技术能够接收到的单个像元的光能量要低得多,从而间接提高了极限成像距离,同时由于目标采样值提取具有类似“距离选通”的特点,采样值中后向散射光成分很少,目标信号信噪比很高。

文中结合压缩感知采样和偏振成像理论提出基于压缩感知的偏振光成像技术,通过构造合适的采

样矩阵和重构算法,设计了具体的成像系统,并通过空气中的成像实验证明了该成像技术的可行性。分析了影响成像质量的三个因素,提出了几种改善措施,目标偏振图像的质量还将有较大的提升空间。文中实验过程主要在空气中进行,为下一步散射介质中的偏振成像研究奠定了基础,对水下偏振成像技术的探索发展有一定的意义。

参考文献:

- [1] Li Hailan, Wang Xia, Zhang Chuntao, et al. The development and analysis of target detection research based on polarization imaging technology[J]. *Optical Technique*, 2009, 35(5): 695-700. (in Chinese)
李海兰, 王霞, 张春涛, 等. 基于偏振成像技术的目标探测研究进展及分析[J]. 光学技术, 2009, 35(5): 695-700.
- [2] Zhang Chaoyang, Cheng Haifeng, Chen Zhaohui, et al. Polarimetric imaging of camouflage screen in visible and infrared wave hand [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 424-427. (in Chinese)
张朝阳, 程海峰, 陈朝晖, 等. 伪装遮障的光学与红外偏振成像[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 424-427.
- [3] Gong Jieqiong, Zhan Haigang, Liu Dazhao. A review on polarization information in the remote sensing detection [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(4): 1088-1095. (in Chinese)
弓洁琼, 詹海刚, 刘大召. 遥感遥测中偏振信息的研究发展[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(4): 1088-1095.
- [4] Yao Tianfu, Zhu Jing, Fan Ye, et al. Usage of polarization characteristic of laser beam in underwater target imaging detection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(6): 061402. (in Chinese)
姚天甫, 朱靖, 樊焯, 等. 激光偏振特性用于水下目标探测[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(6): 061402.
- [5] Zhao Qingliang, Wei Huajiang, Guo Zhouyi, et al. Application of polarized reflectance spectroscopy in biomedical photonics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(10): 78-87. (in Chinese)
赵庆亮, 魏华江, 郭周义, 等. 偏振反射光谱在生物医学光子学中的应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(10): 78-87.
- [6] Walker J G, Chang Peter C Y, Hopcraft K I. Visibility depth improvement in active polarization imaging in scattering media[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(27): 4933-4941.
- [7] Candes E J, Tao T. Near optimal signal recovery from random projections: Universal encoding strategies [J]. *IEEE Transactions on Info Theory*, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [8] Candes E J, Tao T. Decoding by linear programming [J]. *IEEE Transactions on Info Theory*, 2005, 51(12): 4203-4215.
- [9] Donoho D L. For most large under determined systems of linear equations the minimal norm solution is also the sparsest solution [J]. *Communication on Pure and Applied Mathematics*, 2006, 59(6): 797-829.
- [10] Bregman L M. The method of successive project for analysis and filtering of complex wavelets for shift invariant analysis and filtering of signals [J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2001, 10(3): 234-253.
- [11] Daubechies I, Defrise M, Mol C D. An iterative thresholding algorithm for linear inverse problems with least squares[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2007, 1(4): 606-617.
- [12] Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing [M]. San Diego: Academic Press, 1999.
- [13] Bajwa W, Haupt J, Sayeed A, et al. Joint source-channel communication for distributed estimation in sensor networks [J]. *IEEE Transactions Info Theory*, 2007, 53(10): 3629-3653.
- [14] Varshney K R, Cetin M, Fisher J W, et al. Sparse representation in structured to synthetic aperture radar [J]. *IEEE Transaction Signal Processing*, 2008, 56(8): 3548-3561.
- [15] Lustig M, Donoho D L, Pauly J M. Sparse MRI: the application of compressed sensing for rapid MR imaging [J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2007, 58(6): 1182-1195.
- [16] Zhang Cheng, Yang Hairong, Cheng Hong, et al. Image super-resolution reconstruction based on compressed sensing [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(4): 805-811. (in Chinese)
张成, 杨海蓉, 程鸿, 等. 基于压缩感知的超分辨率图像重建[J]. 光电子·激光, 2013, 24(4): 805-811.
- [17] Gan L. Block compressed sensing of natural images [C]// Proceedings of the 15th International Conference on Digital Signal Processing, 2007: 403-406.