

·激光技术·

## 基于压缩感知的非扫描激光雷达成像技术研究

谢殿广, 刘景鹏

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

**摘要:** 压缩感知(compressive sensing, CS)是近年来出现的一种新的信号获取与处理理论,能以远低于奈奎斯特采样率对信号进行采样,并可实现高精度的重构。首先介绍了压缩感知理论,提出了一种基于压缩感知的非扫描激光雷达成像系统,然后详述了系统组成及工作流程,对关键技术进行了分析。该系统以单光子点元探测器作为微弱目标探测元件,通过空间光调制及图像重构技术,实现对微弱目标的超分辨率成像。最后利用OMP重构算法在MATLAB平台上进行了仿真验证,证明了该成像系统的可行性。

**关键词:** 压缩感知;激光雷达;空间光调制;超分辨率;单光子

**中图分类号:** TN249

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2018)-03-0025-04

## Research on Non-scanning Laser Radar Imaging Technology Based on Compressive Sensing

XIE Dian-guang, LIU Jing-peng

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

**Abstract:** Compressive sensing (CS) is a new theory of signal acquisition and processing emerged in recent years, which can sample signals at a rate much lower than the Nyquist sampling rate and implement high precision reconstruction of the signals. At first, the theory of compressive sensing is introduced, a non-scanning laser radar imaging system based on CS is proposed. And then, the composition and workflow of the system are introduced in detail, the key technologies are analyzed. The imaging system uses a single-photon point-type detector as an ultralow light target detector to achieve the super-resolution imaging of an ultralow light target through the spatial light modulation and image reconstruction techniques. And at last, orthogonal matching pursuit (OMP) reconstruction algorithm is used to simulate and validate in MATLAB platform and the feasibility of the imaging system is proved.

**Key words:** compressive sensing (CS); laser radar; spatial light modulation; super-resolution; single-photon

激光雷达成像技术是一种能够获取目标空间信息的主动光学探测技术,目前在航空航天、资源勘探、环境监测及防震减灾等方面取得了广泛应用。激光雷达成像系统按照照明方式可分为扫描和非扫描成像激光雷达,由于非扫描激光雷达没有机械扫描装置,所以具有体积小、宽视场、成像质量好和高可靠性的特点。目前非扫描激光雷达的探测元件主要有电子倍增 CCD(EMCCD)、电子轰击 CCD(EBCCD)、雪崩光电二极管阵列及多阳极微通道板

阵列等<sup>[1]</sup>,这些探测器件都是面元探测器,然而,受到热噪声和暗电流噪声等因素的影响,当微弱信号强度降至单光子水平时,上述器件的极限探测灵敏度和信噪比等技术参数还无法满足应用需求。

对于极微弱目标探测而言,单光子点元探测技术始终走在面元探测技术的前面,并且已经在扫描激光雷达系统中取得了应用<sup>[2]</sup>。随着光电子学及信号处理技术的飞速发展,利用单光子点元探测器进行非扫描激光雷达成像成为了可能。基于压缩感

知思想,利用单光子点元探测器作为微弱目标信号接收装置,提出了一种区别于传统成像体制的非扫描激光雷达成像系统。

该激光雷达成像系统具有如下几方面优点:

极高的探测灵敏度,可实现单光子探测;较高的成像分辨率;较宽的光谱响应范围,适应不同波长成像;体积小及低功耗。

由于具有上述优点,因此在微弱目标探测方面有着广阔的应用前景。重点分析了该激光雷达系统的成像机理,对系统中应用到的空间光调制、单光子探测以及信号重构关键技术进行了详细介绍。

### 1 CS理论

压缩感知(CS)理论是近年来信号处理领域诞生的一种新兴的信号获取和处理理论,由 Donoho D, Candes E 及华裔科学家 Tao T 等人提出,自诞生之日起便极大地吸引了相关研究人员的关注。CS 在解决稀疏重建问题上有着突出的优势,该理论指出假设目标信号是稀疏的或者可以稀疏表示的,则可以通过较少的采样值精确重构出原始信号<sup>[3]</sup>。设  $U$  为长度  $N \times 1$  ( $n \times n$  的二维图像可以看成是  $N \times 1$  的向量,此时  $N=n^2$ ) 的一维待测目标信号,稀疏度

为  $K$  (即含有  $K$  个非零值),  $\Phi$  为  $M \times N$  的二维随机测量矩阵 ( $M < N$ ),  $I = \Phi U$  为长度  $M \times 1$  的一维测量值。CS 问题的核心就是在已知测量值  $I$  和随机测量矩阵  $\Phi$  的基础上,通过求解最优范数问题精确重构  $U$ ,公式表示如下<sup>[4]</sup>

$$\hat{U} = \operatorname{argmin} \|U\|_0 \quad \text{s.t. } \Phi U = I \quad (1)$$

这个过程称之为信号重构或信号恢复,式中  $0$  为向量的范数,表示向量中非零元素的个数。Candes 等指出,要精确重构  $K$  稀疏信号  $U$ ,测量次数  $M$  (即  $I$  的维数)必须满足  $M = O(K \cdot \log N)$ ,并且矩阵  $\Phi$  必须满足约束等距性条件。总体流程如图 1 所示。

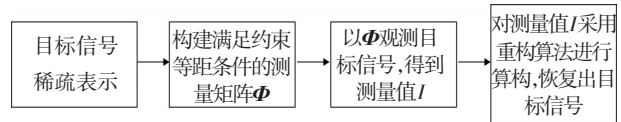


图1 CS理论信号重构流程框图

### 2 基于CS的非扫描激光雷达成像系统组成及工作流程

基于CS理论的非扫描激光雷达成像系统组成如图2所示。

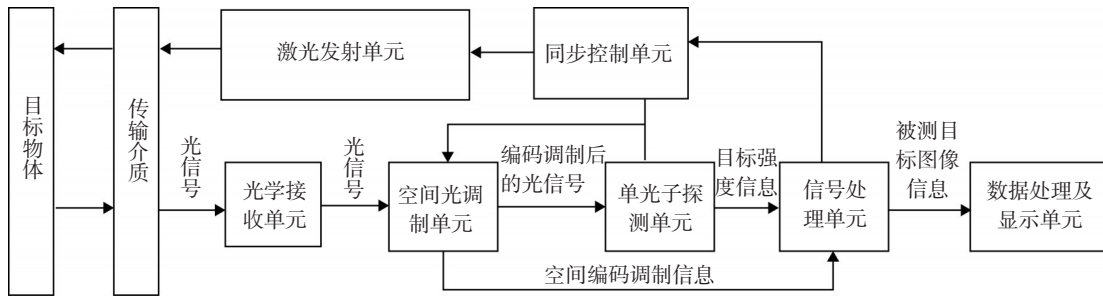


图2 非扫描激光雷达成像系统组成框图

该系统主要由同步控制单元、激光发射单元、光学接收单元、空间光调制单元、单光子探测单元、信号处理单元、数据处理及显示单元组成。根据CS理论可知,重建出目标信号的前提条件是需要获取二维随机测量矩阵  $\Phi$  及一维测量值  $I$ 。该系统利用空间光调制单元构建测量矩阵  $\Phi$ ,单光子探测单元获取目标图像的整体强度信息  $I$ ,通过信号处理技术将原始目标图像  $U$  重构出来,实现对微弱目标

图像的超分辨率探测。

系统工作流程如下:

(1)同步控制单元发出触发信号控制空间光调制单元产生一次编码调制信息,信号处理单元将空间编码调制信息记录存储。

(2)经过一定的时间延迟,同步控制单元向激光发射单元发出启动指令,激光发射单元发射激光束照射被探测目标。

(3)目标回波信号经传输介质被光学系统接收后由空间光调制单元进行编码调制,单光子探测单元根据同步控制单元发出的距离选通波门信号开启快门,获取编码调制后的光信号,并将产生的目标强度信息送至信号处理单元。信号处理单元将目标强度信息记录存储后向同步控制单元发出终止指令,表示一次探测结束。

(4)保持同步控制单元的延迟时间及距离选通波门时间不变,重复上述过程 $M$ 次。

(5)信号处理单元根据测得的 $M$ 个目标强度信息及空间光调制单元产生的测量矩阵,利用重构算法恢复出原始目标图像,送至数据处理及显示系统。

(6)数据处理及显示单元对原始目标图像进行特征提取、匹配及识别等处理,最终检测出原始图像中的待测目标并在显示屏上显示。

### 3 关键技术分析

#### 3.1 空间光调制技术

由CS理论可知,重构出原始图像的前提是找到满足约束等距条件的随机测量矩阵 $\Phi$ 。目前常用的测量矩阵包括随机高斯矩阵、贝努利矩阵、哈达玛矩阵、托普利兹矩阵和稀疏随机矩阵等<sup>[5]</sup>。在硬件实现方面,毛玻璃、液晶光阀及数字微镜阵列(DMD)<sup>[6]</sup>等空间光调制器件能够产生满足约束等距条件随机测量矩阵。相比毛玻璃和液晶光阀等空间光调制器件,DMD器件具有空间分辨率高、调制速度快及精确可控等诸多优点。

以DMD作为空间光调制器件的空间光调制单元组成框图如图3所示。

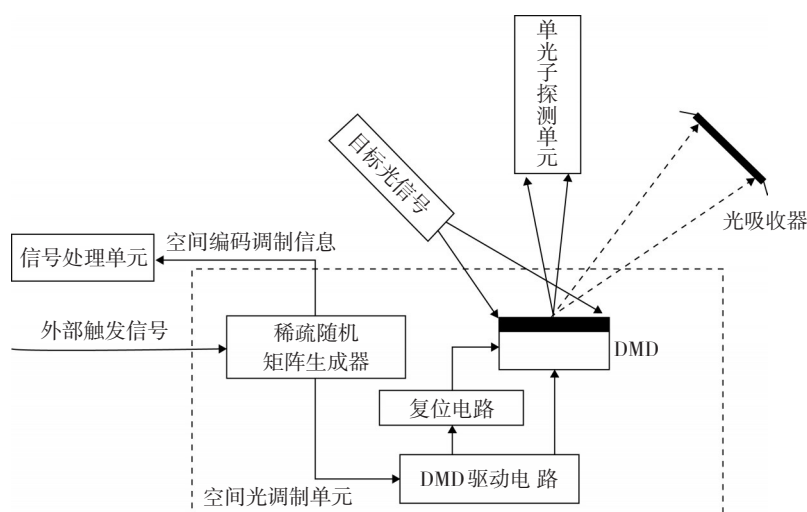


图3 空间光调制单元组成框图

主要由稀疏随机矩阵生成器、复位电路、DMD驱动电路及DMD器件等构成。

当稀疏随机矩阵生成器接收到外部触发信号后,自动生成一个稀疏随机矩阵,其中一路送给信号处理单元,另一路送给DMD驱动电路。DMD驱动电路根据稀疏随机矩阵中的0、1数字信息驱动DMD器件的每一个微镜片“开”、“关”。DMD复位电路按照DMD驱动电路发来的特定时间序列而产生触发信号,在DMD完成一次变换后对其进行复位操作。

#### 3.2 单光子探测技术

工作在盖格模式的雪崩光电二极管(GM-APD)是一种在可见光和近红外光等波段进行单光子点元探测的理想器件<sup>[7]</sup>。当观测目标的光强达到光子水平时,目标光强信号变成了离散的脉冲信号,此时,利用GM-APD进行探测并配上光子计数系统,可实现离散脉冲信号的计数,进而获得目标的整体光强信息。

单光子探测单元主要由准直透镜、汇聚透镜、APD探测器、光子计数装置、温度控制装置、直流偏置和门脉冲抑制电路等部分组成。如图4所示。

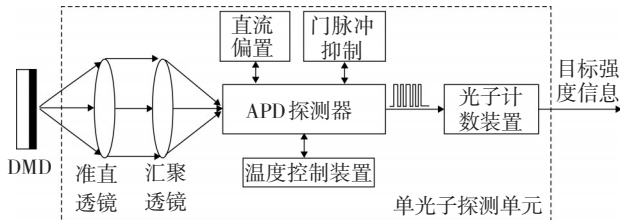


图4 单光子探测单元组成框图

目标光信号经DMD编码调制后通过光学系统准直、汇聚入射至APD探测器,门脉冲抑制电路根据预定的光子到达时刻产生脉冲触发信号,交流脉冲使APD两端直流偏置电压高于击穿电压,APD探测器由普通工作模式转换为盖革工作模式,实现对单光子进行探测。光子计数装置在一定的时间内对光子进行计数,产生目标强度的一次测量值 $I$ 。

若波门打开时间内没有光子到达,由于热激发或隧道效应等同样也会引入暗计数,目前广泛使用的方法是将APD置于低温装置中,如根据珀尔贴效应的TEC制冷装置或使用液氮制冷等,进而降低APD的暗计数。

### 3.3 信号重构技术

压缩感知重构算法主要可分为凸优化算法和贪婪算法两大类,相比于凸优化算法,贪婪算法具有计算复杂度低、重构速度快且硬件易实现等特点,并且很多数值实验表明,当信号受到噪声污染较小时,贪婪算法可以达到与凸优化算法同等的性能。目前贪婪算法主要包括匹配追踪(MP)<sup>[8]</sup>、正交匹配追踪(OMP)<sup>[9]</sup>和分级正交匹配追踪(StOMP)<sup>[10]</sup>等,利用贪婪算法中最为经典的正交匹配跟踪(OMP)算法验证基于压缩感知理论的非扫描激光雷达成像技术的可行性。

实验图像选取美国空军Phillips实验室公布的卫星图片,如图5a所示。由于激光照射目标物体时,受目标表面反射特性、大气湍流和传感器噪声等因素的影响,实际到达探测部件前端的图像应为退化的,选用图5b所示的图像来模拟点扩散函数,相对应退化并引入噪声的图像如图5c所示,图5d为模拟的稀疏随机矩阵图像。实验环境在主频2.3 GHz、

内存2 GB的PC机上,采用Matlab 7.0编程实现。

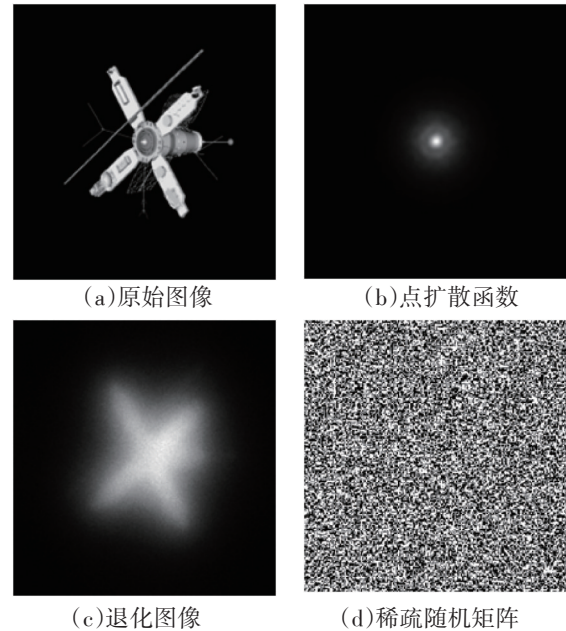


图5 美国空军Phillips实验室公布的卫星图片

利用OMP算法分别在采样率0.3、0.6、0.9的条件下重构出的目标图像,如图6所示。

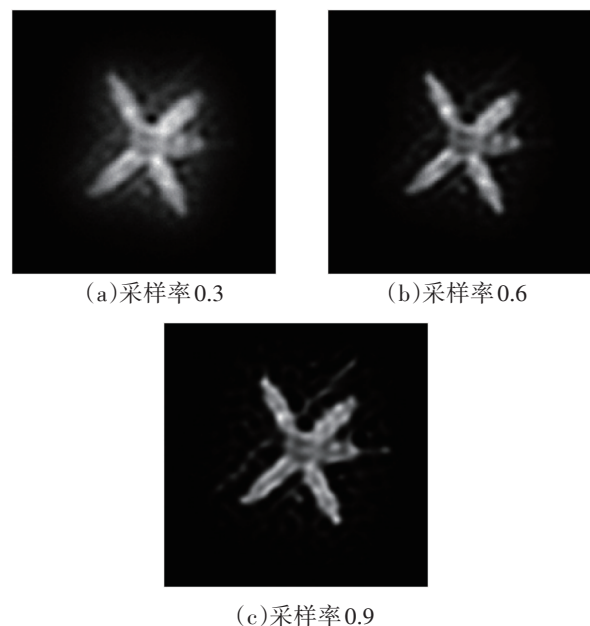


图6 不同采样率下的卫星重构图像

## 4 结论

基于CS理论,提出了以GM-APD为单光子单元  
(下转第34页)



- sion objects [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(3):373-379.
- [8] 刘顺涛, 骆华芬, 陈雪梅, 等. 结构光测量系统的标定方法综述[J]. *激光技术*, 2015(02):252-258.
- [9] Li X, Zhang Z, Yang C. Reconstruction method for fringe projection profilometry based on light beams [J]. *Appl Opt*, 2016, 55(34):9895-9906.
- [10] Xu Y, Wang Y, Ji Y, et al. Three-frame generalized phase-shifting interferometry by a Euclidean matrix norm algorithm [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 84:89-95.
- [11] 符红. 结构光投影三维轮廓测量系统的标定[D]. 浙江大学, 2013.
- [12] Huang J, Wu Q. A new reconstruction method based on fringe projection of three-dimensional measuring system [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 52:115-122.

(上接第28页)

探测器的非扫描激光雷达成像系统。该系统最大的特点是利用点元探测器代替面元探测器进行非扫描激光雷达成像,打破了传统光学成像的模式。由于使用了具备探测光子水平的GM-APD探测器,系统探测灵敏度得到了极大的提高;成像系统的分辨率由空间光调制器DMD的分辨率及目标稀疏程度、复杂程度等因素决定,在信号处理算法足够优化且硬件平台处理能力足够强大的前提下,可以达到很高的分辨率。由于空中目标具有很好的稀疏特性,因此该成像系统非常适用于地对空观测;系统成像质量主要受目标反射特性、传输介质(如大气湍流影响)、探测器噪声和采样率等因素影响,在传输介质及探测器噪声影响一定的情况下,增加系统的采样率会获得更高的图像质量。基于压缩感知的非扫描激光雷达成像系统是激光雷达技术领域一个新的研究方向,将会极大的推动远距离和高分辨率微弱目标探测技术的发展。

#### 参考文献

- [1] 魏继锋, 张凯. 光子计数成像技术及其新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(7):27-32.
- [2] 孙建锋, 闫爱民, 刘德安, 等. 远距离激光成像雷达进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(8):49-54.
- [3] Candès E, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 489-509.
- [4] Donoho D L. Compressed sensing information theory[J]. *IEEE Transactions on*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [5] Richard Baraniuk, Mark Davenport, Ronald DeVore, et al. A simple proof of the restricted isometry property for random matrices[J]. *Constructive Approximation*, 2008, 28(3): 256-263.
- [6] Knipel. Challenges of a digital micromirror device modeling and design[J]. *SPIE*, 1996, 2783: 135-145.
- [7] WAN Jun-li, AI Qing. Temperature compensation for gain of avalanche photodiode in laser gyro[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, 26(7): 18-20.
- [8] Mallat S, Zhang Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3397-3415.
- [9] Dai W, Milenkovic O. Subspace pursuit for compressive sensing signal reconstruction[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, 55(5): 2230-2249.
- [10] Donoho D L, Tsaig Y, Drori I, et al. Sparse solution of underdetermined linear equations by stage wise orthogonal matching pursuit[R]. Department of Statistics, Stanford University, USA, 2006.