阵列分束激光三维成像技术

刘 波,赵娟莹,眭晓林,曹昌东,颜子恒,吴姿妍

(华北光电技术研究所 固体激光技术重点实验室,北京 100015)

摘 要:针对现有激光三维成像中使用的面阵 APD 探测器相邻像元间隔较大,导致激光利用率低从而影响探测距离的缺点,提出阵列分束激光三维成像技术。该技术对激光发射源采用液晶空间光调制器进行衍射阵列分束,将一束激光分成与阵列 APD 探测器相应的阵列子光束,调整激光发射子光束和阵列 APD 探测器的位置,使得子光束照射目标后聚焦到阵列 APD 探测器的像元上,提高了整束激光的利用效率。介绍了阵列分束激光三维成像技术系统组成和工作原理,提出采用液晶空间光调制器的方法实现阵列分束的方案,研制了阵列分束激光三维成像原理样机,利用研制的原理样机对采用阵列分束后的效果进行了验证。实验结果表明,采用该技术后,采用峰值功率 10 kW、脉宽 8 ns 的激光源,填充因子 2/3 的 8×8 APD,三维成像作用距离达到 510 m,同等条件下与不分束相比,作用距离提升 39.1%。

关键词:阵列分束; 激光三维成像; 空间光控制器; 面阵 APD 探测器

中图分类号:TN249 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0606001

Array beam laser three-dimensional imaging technology

Liu Bo, Zhao Juanying, Sui Xiaolin, Cao Changdong, Yan Ziheng, Wu Ziyan

(Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Laser effective utilization rate is low because the gap between adjacent pixels in APD detectors used in laser 3D imaging is too large. Aiming to the question, the array beam laser 3D imaging technology was proposed. A laser beam of the laser radiation source was diffracted into sub-beams in array with a liquid crystal spatial light modulator, so that the laser beam can be divided into sub-beams corresponding to the array APD detector. The positions of the laser beam and array APD detectors were adjusted, so that the laser beam can irradiate on an object and focus on the effective array pixel of APD detector, the utilization efficiency of laser beam was improved. The composition and working principle of array beam laser 3D imaging system were introduced. The scheme to realize the array beam by using liquid crystal spatial light modulator was proposed The prototype of the array beam laser 3D imaging system was studied, and the result of laser array beam using the prototype was verified. The experimental result shows that 3D imaging range reaches 510 meters with peak power 10 kW, pulse width 8 ns, and 8×8 APD detector fill factor 2/3, the effect distance increases by 39.1%, compared with the laser 3D imaging system without array beam.

Key words: array beam; laser 3D imaging; spatial light modulator; array APD detector

收稿日期:2019-01-15; **修订日期**:2019-02-13

基金项目:固体激光技术重点实验室基金(H201601030940)

作者简介:刘波(1981-),男,高级工程师,硕士,主要从事激光成像及激光应用方面的研究。Email:abnerl@163.com

0 引 言

激光三维成像技术可获得目标的三维信息,是目标捕获、识别的理想工具,可广泛应用于导航、侦察、火控、精确制导、机器人视觉、地形测绘等领域。激光三维成像有切片式距离选通激光三维成像[1]、多狭缝条纹管脉冲式非扫描三维成像[2]、连续波调制激光三维成像[3]、强度调制型无扫描激光成像[4]、面阵 APD 激光三维成像[5-12]等几种模式,这几种激光三维成像模式各有优缺点,其中面阵 APD 激光三维成像技术以面阵 APD 作为接收器件,采用激光发射源一次照射目标,得到目标各点的距离像。该技术在探测灵敏度、空间分辨率、距离分辨率、成像可靠性方面有着巨大的前景和优势。美国的林肯实验室[13]、雷声公司[14]等很多大学和研究机构很早就对阵列 APD 探测器、成像整机系统等开展了广泛的研究。随着国内 APD 阵列探测器研制的进步,以面阵 APD 为接收器件的激光三维成像技术也得到了发展。参考文献[8]利用 32×32GM-APD 搭建了激光成像实验平台,并进行了成像实验。参考文献[9]采用 8×8 的线性模式 APD 研制了一套阵列激光三维成像探测器。与目前文献中报道的面阵 APD 激光三维成像体制区别在于探测器像元大小不同,探测器工作模式为线性模式或者盖革模式,数据处理方法也与之对应。在激光发射上是采用一束激光照射目标,经目标反射后聚焦到覆盖到探测器所在的焦平面上。但是受制于面阵 APD 探测器制造工艺,探测器的相邻像元间隔较大,有的甚至大于单个像元本身的尺寸,焦平面上的光只有部分被像元接收。因此,文中提出一种阵列分束激光三维成像技术,根据探测器像元数和像元间距,采用液晶空间光调制器灵活地将发射激光分成与阵列探测器相对应的子光束,使得经过目标反射后的每个子光束回波信号聚焦到相应的探测器单元,避免聚焦到探测器间隔处,有效利用激光能量,提高作用距离。该技术对应不同探测器适应性强,应用潜力巨大。

1 系统组成和工作原理

阵列分束型激光三维成像技术总体方案如图 1 所示,阵列探测器采用 8×8 APD 探测器,激光发射源发射脉冲激光,脉冲激光经过准直扩束后通过液晶空间光调制器分成 8×8 路子光束,子光束照射目标,经反射后返回到接收望远镜,通过阵列 APD 实现阵列光信号向电信号的转换,产生多路微弱电信号,电信号经过放大、整形和阈值比较后进入距离信息处理电路,结合主波信号通过激光脉冲飞行时间和幅度判断运算法则获取目标上多点的距离,最后通过数据处理得到目标的距离三维图像。

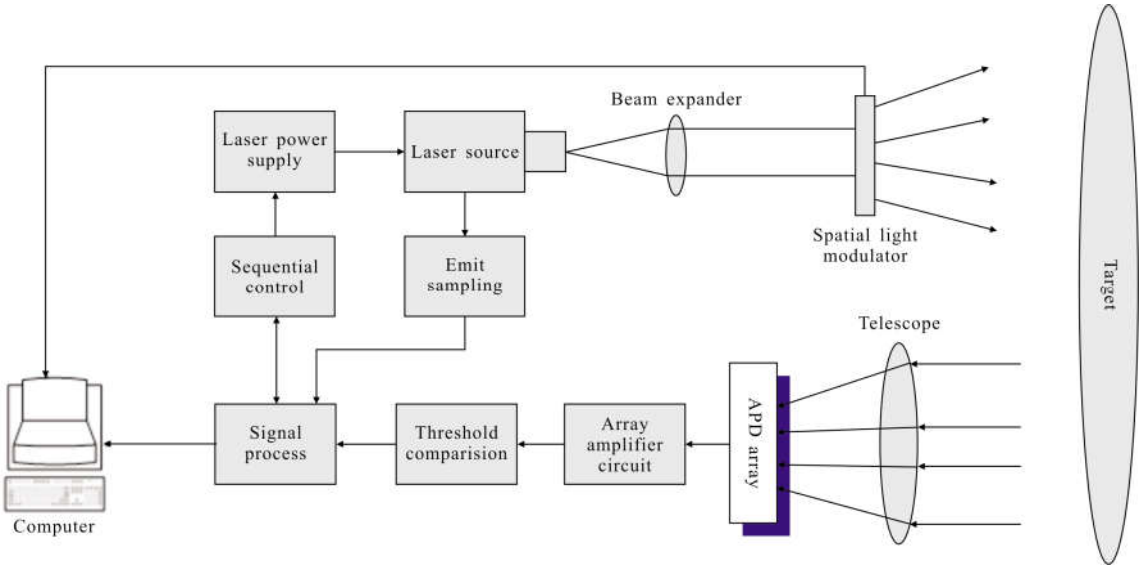

图 1 阵列分束型激光三维成像系统组成

Fig.1 Structure frame of array beam laser 3D imaging

根据激光雷达方程,当激光对大目标进行成像 时,到达探测器面上激光接收功率为:

$$P_r=\frac{P_tA_rk_tk_r\rho e^{-2\sigma R}}{\pi R^2} \tag{1}$$

式中：P_t 为激光发射脉冲功率；A_r 为接收面积；k_t 为发射光学系统效率；k_r 为接收光学系统效率；ρ 为目标反射率；R_{max} 为最大可探测距离；σ 为大气衰减系数。

设接收采用 $N\times N$ APD 探测器的填充因子为 ff，若激光发射不采用阵列分束，而是发射一个光束经目标反射后通过镜头汇聚到 $N\times N$ APD 探测器上，则对每个 APD 而言，其收到的激光功率为：

$$P_1=\left(\frac{1}{N}\times ff\right)^2\times P_r=\left(\frac{1}{N}\times ff\right)^2\frac{P_tA_rk_tk_r\rho e^{-2\sigma R}}{\pi R^2} \tag{2}$$

若要能测得目标距离信息，必须满足：

$$P_1\geqslant P_{rmin} \tag{3}$$

式中：P_{rmin} 为探测器最小可探测功率。

由公式(2)和(3)得到不分束时单元探测器能探测的最大距离为：

$$R_1=\left[\frac{P_tA_rk_tk_r\rho e^{-2\sigma R_1}}{\pi P_{rmin}}\right]^{1/2}\left(\frac{1}{N}\times ff\right) \tag{4}$$

若采用阵列分束，则每一个激光子光束发射的功率变为 $\left(\frac{1}{N}\right)^2\times P_t$，代入到公式(1)得到分束时每个探测器收到的激光功率为：

$$P_2=\frac{\left(\frac{1}{N}\right)^2P_tA_rk_tk_r\rho e^{-2\sigma R}}{\pi R^2} \tag{5}$$

若要能测得目标距离信息，必须满足：

$$P_2\geqslant P_{rmin} \tag{6}$$

由公式(5)和(6)得到采用阵列分束后可探测的最大距离为：

$$R_2=\left[\frac{P_tA_rk_tk_r\rho e^{-2\sigma R_2}}{\pi P_{rmin}}\right]^{1/2}\left(\frac{1}{N}\right) \tag{7}$$

假设两种情况下系统参数和大气衰减一样，$\frac{R_1}{R_2}=ff$，而 $ff\leqslant 1$，采用分束后可以提高最远作用距离值，提高比例和填充因子的关系为：

$$\alpha=\frac{1}{ff}-1 \tag{8}$$

由于在阵列分束时，存在部分能量损失，设衍射效率为 η，则公式(8)为：

$$\alpha=\frac{\sqrt{\eta}}{ff}-1 \tag{9}$$

图 2 为在某一固定衍射效率下距离提高比例和填充因子的关系，可以看出，填充因子越小，对距离提高作用越大。

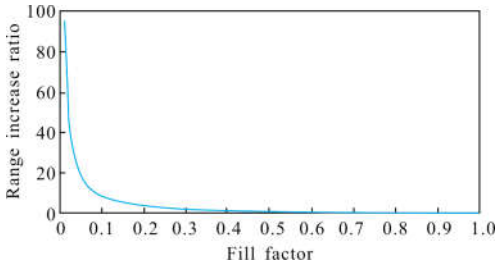

图 2 距离提高比例和填充因子的关系

Fig.2 Relationship between range increase ratio and fill factor

2 阵列分束的实现以及与阵列探测器的精确配准

为了实现灵活可变的阵列分光，文中提供了一种基于液晶空间光调制器制作的相位型光栅，产生二维光阵列。根据现有空间光调制器[15]的技术参数，用迭代傅里叶级数算法，模拟和设计光栅，计算光强分布，产生具有高峰值光强和光强梯度的光阵列，优化光栅的相位分布。区别于传统二元衍射光学器件的阵列分光技术，该方法可通过计算机灵活改变空间光调制器上的相位图，实现灵活地改变入射光束的相位。空间光调制器的分辨率要和面阵 APD 探测一致，空间光调制器的分辨率很高，随着以后的面阵 APD 探测器增加到 256×256，采用空间光调制器很容易与之相匹配。降低了使用系统的成本，增加了灵活性。

如图 3 所示，用波长为 1 064 nm 的平面波照射空间光调制器，通过调节空间光调制器加载的光栅可调节光束相位，实现 8×8 激光发射子光束。

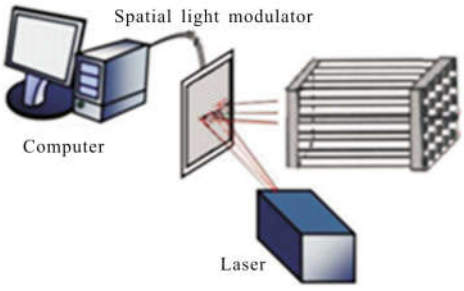

图 3 阵列分光产生示意图

Fig.3 Diagram of array beam generation

分束后的激光子光束照射目标后，经过目标漫反射再被镜头接收后，如果不能聚焦在相应的探测

器有效像元上,而是聚焦在间隔上,会引起激光能量利用率下降,降低成像作用距离。因此要将分束后发射子光束与阵列探测器精确配准,确保子光束返回后能聚焦在探测器的有效像元,且一一对应。

文中提出图 3 的方式来调整发射的每个阵列光束与接收探测器单个阵元匹配。图 3 中,发射系统中发射的 8×8 束激光束照射到远处的凹面镜,在上端的接收系统中,APD 阵列探测器与接收镜头之间加入分光棱镜,外加一束激光照亮 APD 阵列的各个像元,各像元反射回来的光束射到凹面镜上,在凹面镜焦面放置光斑分析仪可观察两路阵列光束的分布情况,通过光斑分析仪的观察,再调整接收镜头和 APD 俯仰方位,可实现阵列光束与 APD 阵元像素在无限远处的一一对应,即完成了发射阵列光束与接收探测器阵元的匹配。

通过图 4 所示调试技术,保证发出的每个子光束经目标反射后回到相应的探测单元。分光棱镜是为了将发射的子光束和接收探测器调节同轴而放置的,是一个调节装置。调整完毕样机正常使用时会将其移除,不会影响系统使用。

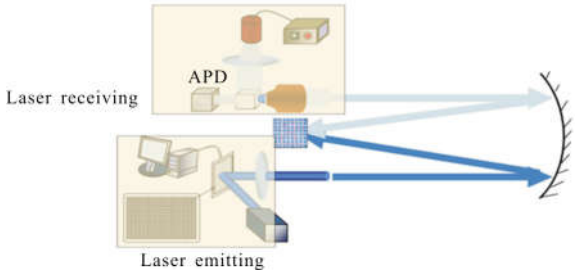

图 4 发射子光束和阵列探测器精确匹配

Fig.4 Precison match between emitting sub-beam and array detector

文中对研制的激光分束系统进行了测试,对其衍射效率、均匀性、子光束之间的夹角进行了测量。图 5 为子光束远场光斑。

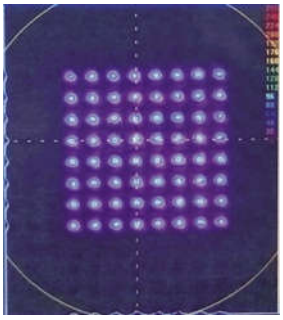

图 5 子光束远场光斑

Fig.5 Far field spot of sub-beam

实测衍射效率 93%,子光束均匀性>90%,子光束夹角 0.5 mrad,能够满足激光三维成像的需求。

3 实验验证及分析

将激光发射、接收系统、激光阵列分束系统和多路数据采集放大处理系统进行系统集成,研制成阵列分束型激光三维成像系统。在理论分析的基础上,建立了阵列分束型三维距离信息提取算法的模型,并编写了数据处理软件。系统同时接收 64 路激光回波信号,对回波信号放大处理后得到目标距离像,对目标距离进行中值滤波、图像增强、图像匹配等预处理,最后提取物体的三维信息。激光波长 1 064 nm,峰值功率 10 kW,脉宽 8 ns,阵列探测器采用 First Sensor 的 8×8 APD,每个像元大小为 205 μm,像元间隔为 115 μm,探测器的填充因子约为 2/3,成像距离作用距离达到 510 m,距离精度优于 0.6 m,空间分辨率 0.5 mrad,成像帧频 20 Hz。利用研制的原理样机对不同目标进行成像实验。图 6 方框内为实际目标的二维图像,图 7 为 8×8 阵列各点测得的距离值。图 8 为利用测量得到的距离值作出的距离颜色图。

图 6 目标的二维图像

Fig.6 2D image of target

510.5	510.2	509.5	508.5	508.0	508.0	508.5	508.8
510.5	510.5	509.5	508.9	508.5	508.5	508.5	509.0
511.0	510.3	510.0	509.5	509.5	509.0	508.5	508.7
509.0	509.3	509.8	510.0	509.2	508.5	509.7	510.5
508.0	509.3	510.5	509.5	509.0	509.0	509.0	514.0
509.5	511.0	511.0	509.5	509.2	509.5	508.5	514.5
512.8	512.8	511.8	510.0	510.0	508.5	511.8	515.0
514.5	514.5	514.5	510.0	519.3	511.2	515.0	515.0

图 7 8×8 APD 阵列各点测得的距离值

Fig.7 Measured range value of each point based on 8×8 APD array

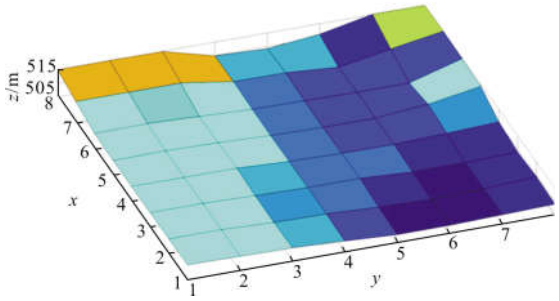

图 8 目标的距离颜色图像

Fig.8 Distance color map of target

通过对 64 个点的作用距离分析,当激光子光束与阵列探测器空间位置关系存在偏差，没有一一对齐时,有些行或列的作用距离出现缺失。只有当两者的位置精确匹配时，每个探测器像元才能探测到有效回波信号,达到提高激光作用距离的目的。

当发射激光无阵列分束时，即经过扩束准直后的激光直接发出，经目标物体返回后与阵列探测器的接收视场相匹配。在其他条件相同情况下,不分束的作用距离为 366.4 m，采用阵列分束作用距离提高了 39.1%。根据公式(8)理想情况下可以提高 44.6%,在实验中存在激光子光束和探测器像元一一对应时的损失,距离对比如表 1 所示。

表 1 距离值对比

Tab.1 Comparsion of range value

Range using a laser beam/m	Range using array sub-beam/m	Range increase ratio
366.4	510	39.1%

同时对 8×8 阵列探测器中每一路接收到的数据连续采集 100 次,计算其均方根值,64 路数据中最大的一路均方根值为 0.6 m,可以看出采用分束后每一路的测量精度均得到保证。

对实验结果进行分析发现，采用阵列分束对成像作用距离的提升能力和探测器的填充因子有关,针对有些探测器像元 50 μm,像元间隔为 150 μm,探测器的填充因子为 1/4,对此探测器,理想情况下采用阵列分束可以将作用距离提高 3 倍。探测器的填充因子越小，阵列分束在激光三维成像中对距离的提升作用越大。

为了能够充分发挥阵列分束的效能,必须调节分束后子光束与阵列探测器的相对位置,确保接收镜头收到的子光束能聚焦在探测器的有效像元,否则会降低成像作用距离,文中采用特定调试技术,保证发出的每个子光束经目标反射后回到相应的探测单元。

目前探测器像元数不高,有 32×32,8×8 像元,随着探测器研制水平的提高，探测器的像元数也会相应增大到 256×256,采用空间光调制器进行分束时,是将分光效率和分束均匀度这两个参数作为输入进行迭代优化运算,计算出满足条件的相位膜片,所以从原理上说,随着子光束的增多,衍射效率和均匀性并不会显著降低。采用传统的光栅容易受到工艺的影响。采用空间光调制器的好处是分辨率高,可以很容易提高到与之相应的分辨率,应用前景广。

文中所提出的阵列分束的方法能应用在不同大小和像元的面阵 APD,相同条件下都能提高作用距离。

4 结 论

文中提出了阵列分束激光三维成像技术，通过采用空间光调制器对激光进行阵列分束，理论和实验均验证了此种分束方法能有效提高阵列 APD 作为探测器的激光三维成像的作用距离,通过研制的原理样机,验证了方案的可行性,实现成像距离 510 m,同等条件下,相比于不分束方案作用距离提高39.1%。研究发现,随着探测器的填充因子的减小,该方法对作用距离的提高越明显。

参考文献:

[1] Zhang Y, Zhao Y, Liu L, et al. Improvement of range accuracy of range-gating laser radar using the centroid method[J]. ***Applied Optics***, 2010, 49(2): 267-271.

[2] Wei J S, Wang Q, Sun J F, et al. High-resolution imaging of a long-distance target with a single-slit streak-tube lidar [J]. ***Journal of Russian Laser Research***, 2010, 31(4): 307-312.

[3] Redman B C, Stann B, Lawler W, et al. Chirped AM ladar for anti-ship missile tracking and force protection 3D imaging: update [C]//Laser Radar Technologty and Applications XI, SPIE, 2006, 6214: 62140O.

[4] Liu Bo, Geng Lin, Liu Lin, et al. Scannerless laser imaging technology based on multi-channel receiving[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(12): 1206008. (in Chinese)
刘波, 耿林, 刘林, 等. 双通道接收的无扫描激光成像技术[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 1206008.

[5] Beck J D, Scritchfield R, Mitra P, et al. Linear mode photon

counting with the noiseless gain HgCdTe e-avalanche photodiode [J]. ***Optical Engineering***, 2014, 53(8): 081905.

[6] Farzin Amzajerdian, Vincent E Roback, Alexander E Bulyshev, et al. Imaging flash LIDAR for safe landing on solar system bodies and spacecraft rendezvous and docking [C]//SPIE, 2015, 9465: 946502.

[7] Jack M, Chapman G, Edwards J, et al. Advances in LADAR components and subsystems at Raytheon [C]//SPIE, 2012, 8353: 83532F.

[8] Sun Jianfeng, Jiang Peng, Zhang Xiuchuan, et al. Experimental research of 32×32 InGaAs Gm-APD arrays laser active imaging [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(12): 1206005. (in Chinese)
孙剑峰, 姜鹏, 张秀川, 等. 32×32 面阵 InGaAs Gm-APD 激光主动成像实验[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 1206005.

[9] Wang Feng, Tang Wei, Wang Tingfeng, et al. Design of 3D laser imagingreceiver based on 8×8 [J]. ***Chinese Optics***, 2015, 8(3): 422-427. (in Chinese)
王飞, 汤伟, 王挺峰, 等. 8×8 APD 阵列激光三维成像接收机研制[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 422-427.

[10] Adamo G, Busacca A. Time of flight measurements via two lidar systems with SiPM and APD [C]//AEIT International Conference. IEEE, 2017: 1-5.

[11] Mcmanamon P F, Beck J D, Watson E A. Comparison of flash lidar detector options [J]. ***Optical Engineering***, 2017, 56: 031223.

[12] Sun X, Abshire J B, Beck J D, et al. HgCdTe avalanche photodiode detectors for airborne and spacebornelidar at infrared wavelengths[J]. ***Optics Express***, 2017, 25(14): 16589.

[13] Aull B F, Loomis A H, Young D J, et al. Three-dimensional imaging with arrays of Geiger-mode avalanche photodiodes [C]//Lasers and Electro-Optics, 2003. CLEO′03. Conference on. IEEE, 2003: 467-468.

[14] Daniel Chisholm M A, Martin Knapp B A, Bsc J A, et al. Update on linear mode photon counting with the HgCdTe linear mode avalanche photodiode [J]. ***Optical Engineering***, 2014, 53(8): 081906.

[15] Gu Songbo, Xu Shuwu, Lu Junfa, et al. Generation of the array of optical traps by liquid crystal spatial light modulator [J]. ***Acta Physica Sinica***, 2012, 61(15): 189-196. (in Chinese)
顾宋博, 徐淑武, 陆俊发, 等. 用液晶空间光调制器产生光阱阵列[J]. 物理学报, 2012, 61(15): 189-196.