

双通道接收的无扫描激光成像技术

刘 波¹, 耿 林¹, 刘 琳², 曹昌东¹, 眭晓林¹, 颜子恒¹

(1. 固体激光技术重点实验室, 北京 100015;

2. 华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 比较了几种无扫描激光三维成像技术的优缺点, 提出一种基于双通道接收的强度调制型无扫描激光三维成像技术, 该技术具有成像速度快、精度高、可靠性好、距离远的特点。采用大功率脉冲激光器作为激光照射源, 两路 ICCD 同时接收, 双通道分光系统将接收回波分到两路 ICCD, 通过两路 ICCD 强度信息反演出目标各点距离信息。重点介绍了该项技术工作原理和实现方法, 研制了原理样机, 进行了成像实验, 对成像结果进行了分析, 实现了作用距离 5.1 km、作用距离 30 m 时距离分辨率 0.25 m 的技术指标。

关键词: 无扫描激光三维成像; 强度调制; 双通道接收; 增强电荷耦合器件

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1206008

Scannerless laser imaging technology based on multi-channel receiving

Liu Bo, Geng Lin, Liu Lin, Cao Changdong, Sui Xiaolin, Yan Ziheng

(1. Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, Beijing 100015, China;

2. North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: The advantage and disadvantage of different scannerless three-dimensional laser imaging systems was compared, the intensity modulation scannerless three-dimensional laser imaging technology based on multi-channel receiver was proposed. The technology has the advantage of fast imaging, high precision, high reliability, long distance. The high power pulse laser as the illumination source, two ICCD received the echo from dual channel sub optical system at the same time, the distance information was analyzed through the ICCD intensity information. The technology principle and approach was introduced. The principle sample machine was designed, and on which the imaging experiment was carried out. The experiment result shows that the imaging range is 5.1 km, range resolution is 0.25 m when range is 30 m.

Key words: scannerless laser three dimensional imaging; intensity modulation; multi-channel receiving; ICCD

收稿日期: 2016-04-10; 修订日期: 2016-05-12

基金项目: 固体激光技术重点实验室基金

作者简介: 刘波(1981-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事激光成像和激光探测方面的研究。Email: abnerl@163.com

0 引言

无扫描激光三维成像探测技术作为一种全新的激光成像探测技术,相对于扫描成像探测系统,具有成像精度高、成像速度快、可靠性好,结构紧凑的特点。目前无扫描激光三维成像主要有切片选通式激光三维成像^[1]、条纹管激光三维成像^[2-3]、连续波调制激光三维成像^[4-5]、增益调制激光三维成像^[6-7]、阵列 APD 激光三维成像^[8]。切片选通式激光三维成像去掉了传统的扫描器,但其成像速度以及测距精度受选通门宽的制约,探测精度越高,所需切片数越多,难以实现同时高精度和高速成像。多狭缝条纹管激光三维成像中所需条纹管探测器结构较为复杂,同时探测器面阵的有效利用率较低,目标横向分辨率较低,难以提高像素分辨率。连续波调制激光三维成像需要对激光功率进行高频调制,难以同时提高作用距离和距离分辨率。增益调制激光三维成像需要分别对像增强器增益进行恒定调制和线性调制,影响了三维成像速度。阵列雪崩光电二极管(APD)激光三维成像技术在国内受制于阵列 APD 探测器的研制。文中提出的基于双通道接收的强度调制型无扫描激光成像技术采用双通道高像素增强型数字相机(ICCD)同时接收,对目标表面各点的反射光强度进行归一化,消除光斑不均匀、目标反射率不同对距离测量的影响,使目标强度信息仅仅反映调制增益的不同,提高测距精度。一次激光照射便能得到照射区域各点的三维信息,具有成像速度快、精度高、可靠性好、距离远的特点。

1 基本原理

假设对某一目标照射激光进行三维成像。根据激光雷达方程,到达接收探测器的激光接收功率为:

$$P_r = \frac{P_t A_r k_t k_r \rho e^{-2\sigma R}}{\pi R^2} \quad (1)$$

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 为探测距离; σ 为大气衰减系数。

在系统中采用 ICCD 作为探测器,对一路 ICCD 中的像增强器增益进行恒定调制,设其增益为 G_1 。对另一路像增强器增益进行线性调制,在一定电压范围内,像增强器的增益与所加电压成正比,所加电

压可以设定为随时间线性变化,此时其增益随时间关系为: $G=k \cdot t+G_2$, k 和 G_1 为常数。

恒定增益调制时,激光照射到距离为 R 的目标上 ICCD 收到的光能为:

$$E_1 = P_1 \cdot \int_{2R/v}^{T+2R/v} G_1 \cdot dt \quad (2)$$

线性增益调制时,激光照射到距离为 R 的目标上 ICCD 收到的光能为:

$$E_2 = P_2 \cdot \int_{2R/v}^{T+2R/v} (k \cdot t + G_2) \cdot dt \quad (3)$$

式中: P_1 为恒定增益时激光回波功率; T 为激光脉冲宽度; R 为目标距离; v 为光速; G_1 为恒定增益值,公式(3)中 P_2 为线性增大增益时激光回波功率, k 、 G_2 为增益线性变化时的系数。通过两次 ICCD 的光能的比值即可得出距离值。

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{P_2 \cdot \int_{2R/v}^{T+2R/v} (k \cdot t + G_2) \cdot dt}{P_1 \cdot \int_{2R/v}^{T+2R/v} G_1 \cdot dt} \quad (4)$$

采用双通道接收后, $P_1=P_2$ 。则由公式(4)可得到目标距离:

$$R = \frac{E_2}{E_1} \frac{G_1 v}{2k} - (G_2 + \frac{kT}{2}) \frac{v}{2k} \quad (5)$$

若不采用双通道同时接收,则需要两次激光照射才得以解算得出目标区域的三维图像,每次到达接收探测器的激光接收功率受到激光发射脉冲功率、目标反射率、大气衰减系数等因素影响,对运动目标而言,这些参数可能会发生变化,由公式(4)看出,会影响成像精度,同时目标的位置在两次激光照射的间隔内发生,此时所解算出的三维距离信息也存在偏差。采用文中提出的双通道接收的方法,只需要一次激光照射就可解算出目标距离信息,不存在两次激光照射参数不一致的问题,也不存在目标在两次照射间隔位置发生变化的问题。

文中所提出的系统原理图如图 1 所示。

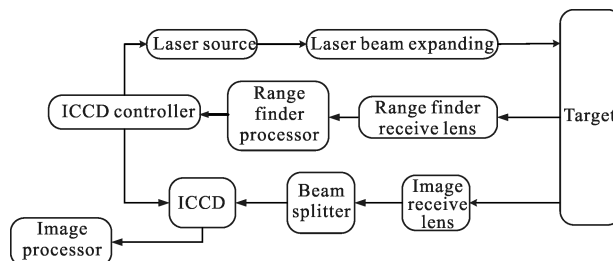


图 1 原理图

Fig.1 Schematic diagram

2 系统实现

2.1 双通道接收的实现选择

双通道接收有三种实现方式：一是利用同一套接收设备进行两次曝光，两幅图像对应像素相减可以消除背景目标反射率不同所带来的问题，但必须保证两次照射中激光光斑强度分布的一致性，同时对高速运动目标，两次曝光所捕获的图像不会完全一致，这将大大增加数据处理的难度；二是采用两套接收镜头和两套像增强器在一次发射期间同时成像，这将可以降低或消除光斑不均匀性和目标反射率不同所带来的问题，但是需要使两个镜头完全平行并且视场、焦距等参数完全一致，否则也将极大地增加图像匹配的难度；三是利用同一个成像光学镜头，设计分光系统，将镜头所收集的光信号分配到两套成像期间，这样就不存在镜头调焦参数不一致的情况。经过理论和实验分析比较，第三种方法的效果最好。

2.2 分光系统的实现

在该系统中，激光回波信号经过成像镜头和光学分光系统，将图像成于两个同一型号的黑白相机上。镜头在相机的光敏面上耦合有像增强器，其有效工作直径为 18 mm。

为了保证进入相机光敏面的能量不损失，分光系统的光圈应与成像镜头的最大光圈相匹配，同时，分光系统为有限远对有限远成像，成像镜头的像面在分光系统的物面处。

采用对称型光学系统，此类系统的优点是结构对称，物像关系对称，从而系统的畸变、彗差等垂轴像差相互抵消，剩余像差小，容易校正。在中间平行光路中放置半反半透棱镜，可以保证棱镜体积最小，且装调简单。

由于分光系统的物面较大，使后继系统的口径增加，为了减小系统体积，在物面附近设计场镜，压缩主光线高度。经过反复追光设计，分光系统的光路如图 2 所示。

由于分光系统是针对单色光进行分光的，所以光学设计没有色差，主要校正球差、像散和畸变。图 3 和图 4 分别为系统在特征频率 60 lp 处的传递函数评价和畸变、像散分析。从图中可以看出，系统像差

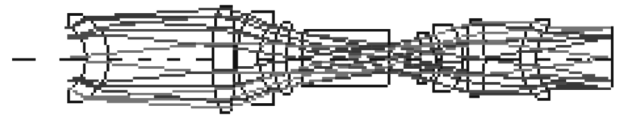


图 2 光学系统的光路图

Fig.2 Optical path of optical system

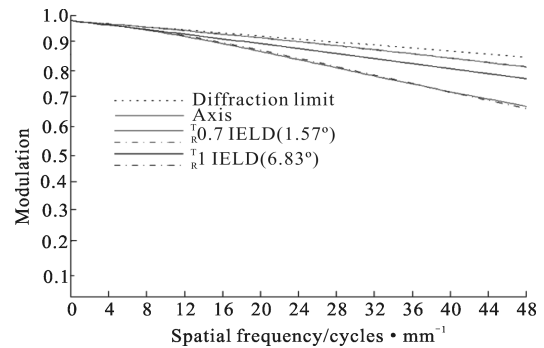


图 3 光学传递函数评价

Fig.3 Optical transfer function evaluation

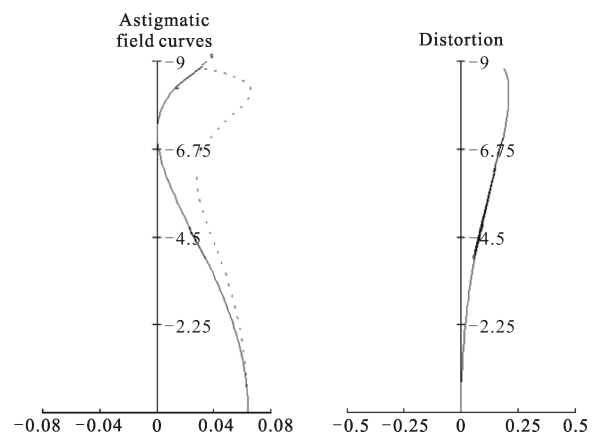


图 4 像散和畸变分析

Fig.4 Analysis of astigmatism and distortion

很小，MTF 接近衍射极限；畸变仅为 1.7%，远远小于观察系统不能超过 5% 的要求；像散也在成像系统要求范围内。可见，分光系统有优良的成像质量。

2.3 双通道接收图像匹配

采用双通道 ICCD 同时接收能够改善光斑和背景差异以及物体运动所带来的精度退化。虽然共用一套接收光学系统，但所捕获的图像与像增强器的安装位置还存在关系，因此两幅图像也难以做到完全的一致，这对距离的解算会产生影响。依靠机械调整使两幅图像完全重合是及其困难的，因此，必须研制图像自动匹配软件，在室内对靶标上的特定点进行匹配和识别，用软件自动将两幅图像进行平移和旋转变换，找出图像中各像素点的一一对应关系。从

而提高成像精度。

该系统中通过双通道图像分别对同一十字靶板进行成像,通过图像滤波、增强、Hough 变换、边缘检测等方法测出每个十字靶板分别在两个 ICCD 中成像位置,找出其位置偏差,并对其进行修正,将其偏差控制在 1 个像素。

图 5(a)为树木的二维图像,图 5(b)为没有匹配算法后的图像距离颜色图,图 5(c)为采用匹配算法后的距离颜色图像。从图中可以看出,采用匹配算法后,改善了成像效果、提高了成像精度。

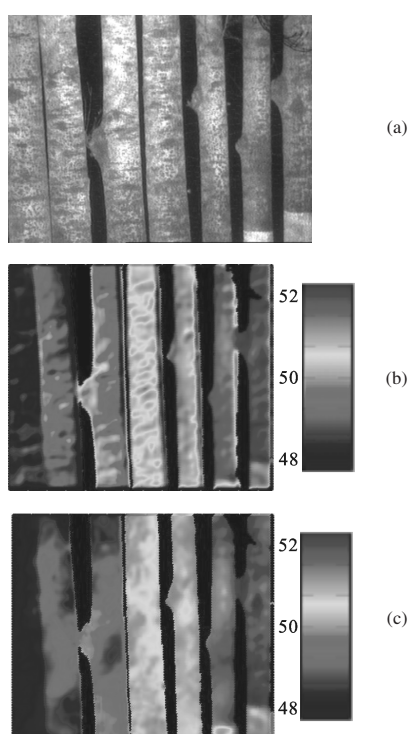


图 5 采用匹配算法后的效果对比图

Fig.5 Effect comparison chart after the matching algorithm

3 系统实验结果

为了验证基于双通道接收的强度调制型无扫描激光三维成像技术的系统性能,搭建了原理样机。激光光源采用 532 nm、脉宽 8 ns、单脉冲能量 170 mJ 的脉冲激光器;探测器采用两路像素为 800×600 的数字式 ICCD;接收镜头口径 80 mm,双通道分光系统采用上述方法设计;实时图像处理器基于 FPGA 和 DSP 设计,处理速度 25 Hz。利用研制的原理样机进行了作用距离实验和距离分辨率实验。实验在白天进行,大气能见度约为 10 km,目标反射率约为 0.2,

为了滤除背景光对系统的影响,在系统中加入窄带滤光片,同时采用波门控制的方法。图 6 为 3 km 处的建筑物的原始图和经过处理后的距离颜色编码图。图 7 为 5.1 km 处的建筑物的原始图和经过处理后的距离颜色编码图。

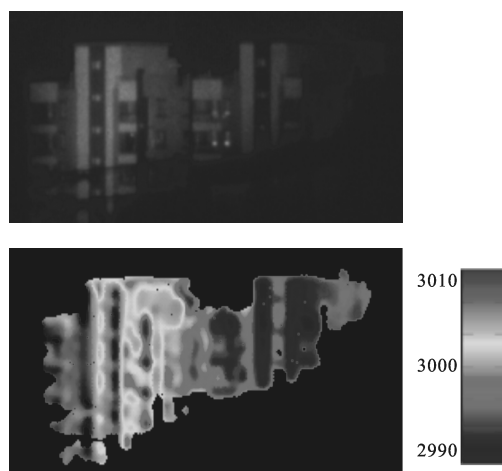


图 6 3 km 处建筑物距离颜色图

Fig.6 3 km building distance color map

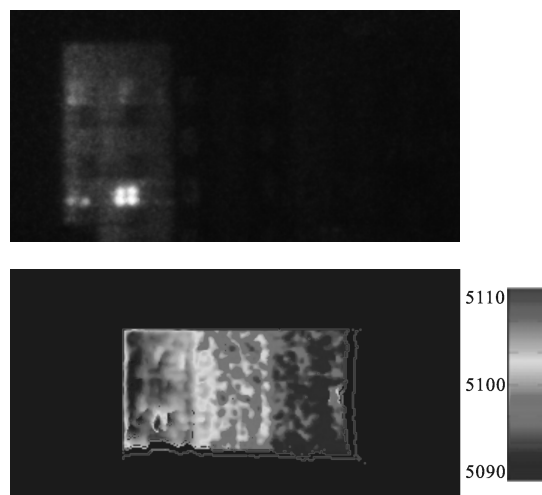


图 7 5.1 km 处建筑物距离颜色图

Fig.7 5.1 km building distance color map

图 8 为 30 m 处间隔 25 cm 的三块靶板的灰度图和距离颜色图,实验结果表明:该系统能将间隔 25 cm 的靶板清晰区隔开。

系统中距离分辨率受到像增强器增益与电压非线性、系统噪声、图像强度数字采样有效位数的影响^[8]。距离分辨率误差为:

$$\Delta r = \frac{v}{2G} \Delta I \left(1 + \frac{1}{\text{SNR}} \right) \quad (6)$$

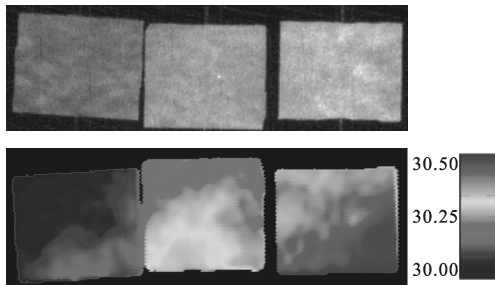


图 8 间隔 25 cm 的靶板目标距离颜色图

Fig.8 Target distance color map of the interval 25 cm

式中： Δr 为距离分辨率误差； ΔI 为信号量化误差； v 为光速； G 为像增强器增益系数；SNR 为系统信噪比，对于 10 为 ICCD，有效位取 8 位，取 $\Delta I=1/256$ ， G 为经过修正后的像增强器增益系数，为 1.4×10^6 ，SNR 取图像质量比较差时的信噪比为 10，代入后 $\Delta r=0.46 \text{ m}$ 。

文中所提出的双通道接收的无扫描激光成像技术，与传统的增益调制激光成像技术相比，主要体现在成像速度快，可对运动目标成像。文中成像帧率为 25 Hz，而传统的需要两次照射解算得出一次距离像，两次照射之间需要对像增强器参数进行调整，无法做到实时性。对运动目标，两次照射之间目标位置已发生变化，此时得出的距离信息不准确。

4 分析与结论

针对不同的实验条件，对不同目标物体进行了三维成像实验。实验发现：作用距离受激光发射功率、激光照明角度、激光与背景光对比度、镜头相对孔径、目标反射率、大气能见度的影响。距离分辨率受到像增强器增益与电压非线性、系统噪声、图像强度数字采样有效位数的影响。文中提出的双通道接收只需一次照射成像，可以解决两次调制成像回波功率不一致的情况，采用数字拟合对像增强器增益与电压非线性进行修正^[10]，通过窄带滤光片和选通控制波门减小背景噪声，同时采用多帧相关和小波运算提高信噪比。作用距离达到 5.1 km，成像分辨率

25 cm(作用距离 30 m 时)，可以应用于目标识别、自主导航、地形测绘等领域。

参考文献：

- [1] Tsagakatakis G, Woiselle A, Tzagkarakis G, et al. Multireturn compressed gated range imaging [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(3): 031106.
- [2] Tian Zhaoshuo, Cui Zihao, Zhang Liting, et al. Control and image processing for streak tube imaging lidar based on VB and MATLAB[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(6): 67-70.
- [3] Zhao Baosheng, Chen Min. The application of MS-streak tube in three dimensional lidar system [J], *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(12): 1425-1427. (in Chinese)
赵宝升, 陈敏. 采用多狭缝条纹管实现激光三维成像[J]. 光子学报, 2004, 33(12): 1425-1427.
- [4] Anthes John P, Philip Garcia, Joe T, et al. Dressendorfer, non-scanned ladar imaging and applications [C]//SPIE, 1993, 1936: 11-22.
- [5] Muguira Maritza R, Sackos John T, Bradley Bart D, et al. Scannerless range imaging with a square wave [C]//SPIE, 1995, 2742: 106-113.
- [6] Jin Chenfei, Hu Peng, Zhang Siqi, et al. Analysis of weak signal processing of gain-modulated laser radar with double thresholds[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2448-2452. (in Chinese)
靳辰飞, 胡鹏, 张思琦, 等. 增益调制激光雷达弱信号的双阈值处理分析 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43 (8): 2448-2452.
- [7] 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): 081905-081905.
- [8] Liu Bo, Zhang Ying, Cao Changdong, et al. Range accuracy analysis for scannerless 3D laser image system [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43: 376-379. (in Chinese)
刘波, 张颖, 曹昌东, 等. 亮度调制无扫描激光三维成像距离精度分析[J]. 激光与红外, 2013, 43: 376-379.