

文章编号: 0258-7025(2010)05-1231-05

单狭缝条纹管激光雷达四维成像实验

魏靖松 王 骐 孙剑峰 郜 键

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 提出了一套用于远距离目标成像的实验设备,介绍了单狭缝条纹管激光成像雷达(STIL)四维(4D)成像实验平台的实验过程。利用这套设备得到了702 m目标条纹像,解释了条纹像和目标之间的对应关系,用多幅条纹像重构了目标的四维图像。简要分析了狭缝、束散角等参数对成像精度的影响。实现了单狭缝条纹管激光成像雷达对远距离目标的成像,且距离分辨率可以达到0.5 m。

关键词 激光技术;条纹管;激光雷达;四维成像;激光成像

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103705.1231

Experiment of Four-Dimensional Imaging with Single-Slit Streak Tube Lidar

Wei Jingsong Wang Qi Sun Jianfeng Gao Jian

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Optic-Electronics,
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract A streak tube imaging lidar (STIL) system is established to finish a field imaging experiment. With thirty streak images piled up, reconstruction contrast map and range map of a target 702 m away are presented. Relationship between streak images and target detail is marked. The range resolution is better than 0.5 m in the experimental result. Imaging precision affected by streak and divergence of laser beam is discussed.

Key words laser technique; streak tube; lidar; four-dimensional imaging; laser imaging

1 引 言

激光雷达具有优越的距离选通能力,使其在三维成像应用中具备了其他成像方法所无法比拟的优势,在航天和军事领域有很高的应用价值。但是,传统激光的小角度出射方式明显制约了整个激光雷达系统的成像帧率^[1~3]。近十年来,国际上致力研究大视场、非扫描成像体制,并且取得了一些成果。以条纹管作为探测器的激光雷达就是这种体制中一个重要的分支,关于它的应用报道也频频出现,目前国际上已经形成了成熟的单狭缝条纹管激光成像雷达(STIL)技术,并在此基础上发展了多狭缝条纹管激光成像雷达,进一步将偏振信息也引入进来。目前条纹管激光成像雷达的应用领域已经覆盖了地形地貌成像、陆地目标成像和 underwater 目标探测等方面^[4~7]。

国内近些年也出现了这种激光雷达的研究报道,但还处于探索性实验研究阶段,所探测的目标多半针对近距离目标^[8,9]。而且针对于这种机理的图像降噪处理方法也处于起始阶段^[10,11]。

本文旨在探索条纹管激光成像雷达对远距离目标的应用,发现实验过程中条纹像和目标表面的对应关系,以及由于长距离成像导致的扫描方向上光束展宽问题,并对此进行分析。最终通过条纹像重构得到目标的强度像和距离像。

2 单狭缝条纹管成像原理

图 1 为利用单狭缝条纹管作为探测器对目标实现三维成像的原理图。单狭缝的成像原理是发射激光经过光学系统变换成为线光源照射到目标上,目

收稿日期:2009-06-11;收到修改稿日期:2009-09-16

作者简介:魏靖松(1981—),男,博士研究生,主要从事条纹管成像方面的研究。E-mail:wjs81@sina.com

导师简介:王 骐(1942—),男,教授,博士生导师,主要从事短波长激光,X光激光及激光空间信息技术方面的研究。

E-mail:qi wang@hope.hit.edu.cn

标被照射部分的散射信号被光学系统接收,聚焦到条纹管光阴极上,如图1(a)所示。目标上不同距离的点的回波信号到达光阴极时间不同,光电转换后生成的电子通过一个电压随时间线性变化的偏压系统,由于不同时刻通过的电子受到的偏转电压也不同,因此,光电子最终轰击条纹管磷屏上的位置不

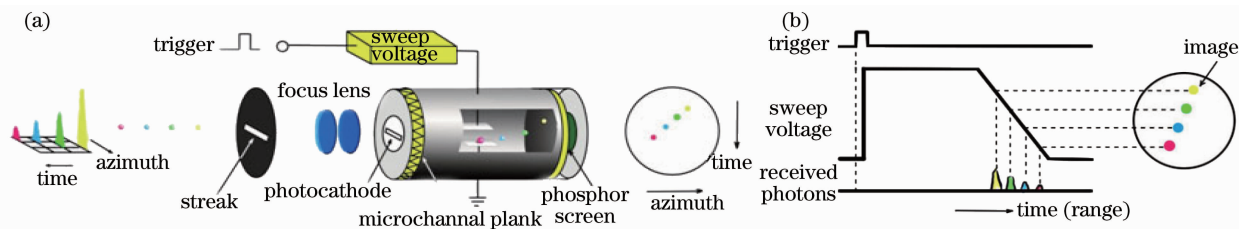


图1 条纹管对目标三维成像原理。(a)原理图;(b)成像结果

Fig.1 Principle of three-dimensional (3D) imaging of targets. (a) principle map; (b) result image

3 实验平台的搭建

本次实验的主要内容是:用单狭缝条纹管作为探测器的激光雷达系统对远距离目标进行探测,采用线扫描的方式,得到一组目标的条纹像,并最终合成目标的四维图像。实验中设备的连接示意图如图2所示。

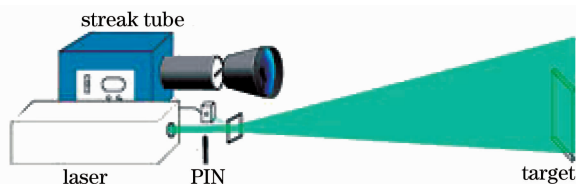


图2 实验设备连接示意图

Fig.2 Map of equipment connection

所采用的倍频 Nd:YAG 激光脉宽12 ns,单脉冲能量40 mJ,束散角约为3 mrad,激光能量的空间分布在激光腔内整形为近似平顶光斑,在一定程度上实现激光能量在空间的均匀分布。激光出射后通过柱面镜在水平方向扩束为 10° ,利用在柱面镜上一小部分反射光触发电探测器,这个信号将作为控制条纹管的触发信号源。目标的小部分散射光被 $\phi 150$ mm的望远镜光学系统收集,经2:1中继透镜后照射到条纹管光阴极上,光阴极表面的空间分辨率可以达到20 lp/mm,结合望远镜光学系统的视场角(10°)和光阴极之间的水平宽度,可以计算出这套系统对于700 m远的目标的空间分辨率约为0.3 m。将光电探测器上由激光触发生成的脉冲电信号输入数字延时器,根据目标距离和系统内部各器件延迟时间设定延时器的延迟时间,然后再输出信号触发条纹管。这样,激光发射时刻和条纹管开

同,会在磷屏上沿垂直偏转电压板平面的方向有一些偏移,可以根据这个偏移量计算出光电子产生的时间差。一个条纹可以还原出目标上被线光源照射位置的剖面轮廓——距离像。将线光源在目标上移动,并采集每一幅条纹像,然后按照一定的方式排列起来,就可以逐步地得到完整的目标像。

始接收光信号时刻的时间差就可以精确控制。由于条纹管的开门时间有限,最长不过几十微秒,因此,对延迟时间的精确控制就等同于对距离选通的控制。延时器设定时间 Δt 表示为

$$\Delta t = \frac{2S}{c} + \sum T_i - T_s, \quad (1)$$

式中 S 为目标距离, c 为光速, T_s 为条纹管从接收到触发信号到开门扫描的时间差, T_i 为除条纹管外其

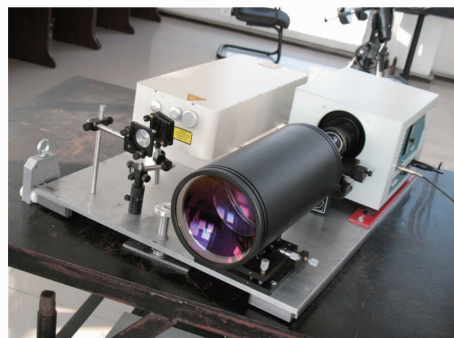


图3 装置照片

Fig.3 Photo of imaging system



图4 目标照片

Fig.4 Photo of target

他设备对触发信号的延迟时间。条纹管采集到的图像被磷屏后的 CCD 获得,传送到计算机上显示。整套实验装置放置在一个可以调整俯仰角的平台上,通过改变平台俯仰角将激光束对准目标的不同高度,实现对目标的线扫描。整套装置如图 3 所示。实验中选择的 目标为距离 702 m 的建筑物,如图 4

所示。

4 实验结果分析与讨论

实验获得目标的部分原始条纹像如图 5 所示。在进行目标像重构前,先进行图像增强处理,如图 6 所示,条纹像和目标像的对应关系如图 7 所示。

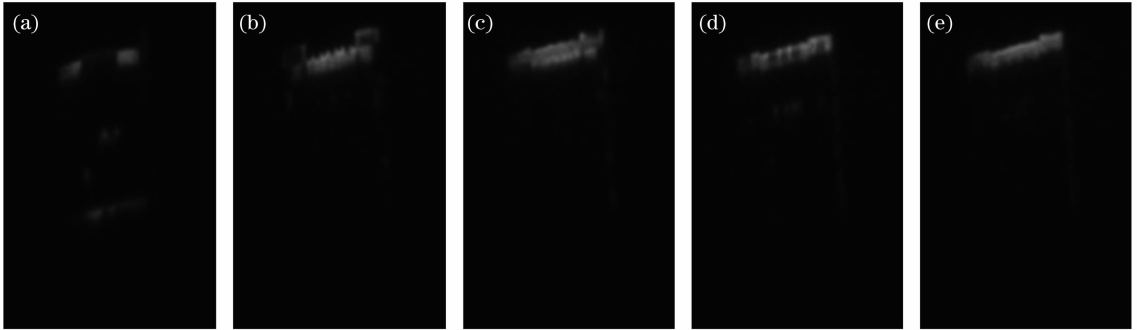


图 5 原始条纹像

Fig. 5 Raw streak images

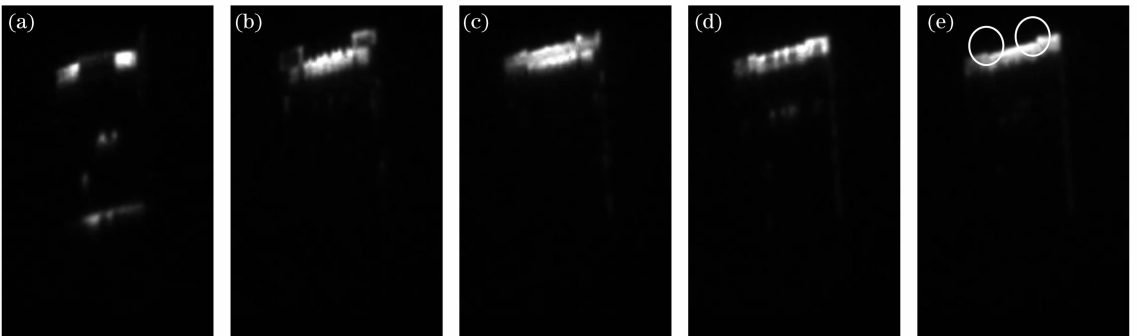


图 6 增强条纹像

Fig. 6 Enhancement of streak images

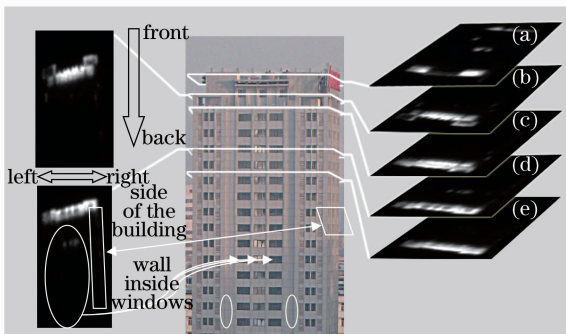


图 7 条纹与目标对应关系

Fig. 7 Relation between streak images and target detail

图 6 的条纹像中,每一幅条纹像对应于目标的一个水平切片,每个切片的厚度约为 2.1 m,是由激光束散角和目标距离共同决定的。条纹像中垂直方向从上到下表示目标距离的由近及远,水平方向表示目标的水平空间分布,不体现距离信息。从图 6 中可以看出目标并不是正向面对探测器,而是右

侧较左侧稍近,从图 6(b)~(e)中近似垂直的斜线也可以印证这一点,斜线对应着目标楼侧面墙,如图 7 所示。图 6(a)所示的是目标天台上所成的条纹像,清楚地显示了天台上各目标的空间距离信息。图 6(d)所示的是激光束照射在窗户位置得到的条纹像,在目标表面所成的条纹像后面,可以清楚地看到激光透过窗户对窗内墙所得到的像。图 6(b), (c), (e)中同样也可以发现这样的条纹像,但并不如图 6(d)清晰,这是由于激光束主要能量没有分布在窗户位置上造成的。

实验中共采集了 30 幅扫描条纹像,每一幅条纹像的每一列都从垂直方向中判断最亮点,作为目标上这一行中某一方位角上的距离判断点,从这个点在图像上的垂直位置提取距离信息,并记录这一点的强度信息,这两项信息形成了重构目标像中的一行。将 30 幅条纹像的距离和强度信息制作成 30 行具有一定宽度的图像,并且按照采集顺序进行叠放,

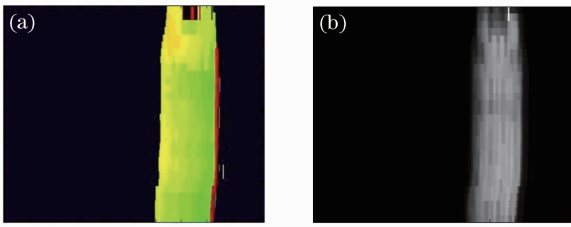


图 8 目标重构图像。(a) 距离像;(b) 强度像

Fig. 8 Reconstruction images of targets

(a) range image; (b) intensity image

就得到了目标的重构图像,如图 8 所示。

图 8(a)所示的距离像由伪彩色表示距离信息,图中用颜色(绿-黄-红)的变化表示距离的由近及远的变化过程(彩图请查看网络电子版),图 6(e)中标示位置为目标两侧的台阶形突起,对应于实物图 7 下方的椭圆形标注内的部分,经实地测量,突起位置前后距离差约为 0.5 m。在图 6(e)中可以清晰地观察到,这个差别也很容易在图像软件中识别出来,这说明该套成像系统可以提供 0.5 m 的距离分辨率。本次实验并未对距离分辨率进行详细测量,理论上极限距离分辨率可计算为^[4]

$$\sigma \approx 0.6 \frac{c \cdot \tau_{\text{FWHM}}}{R_{\text{SN}}}, \quad (2)$$

式中 τ_{FWHM} 为激光脉宽, R_{SN} 为信噪比。

实验中所取得的图像数据均是在条纹管光阴极前未加狭缝的条件下取得的,这是因为激光束在出射时就已经是水平条状。在加狭缝与不加狭缝的对比测试试验中,所加狭缝宽度为 100 μm ,图 9 所示为两种情况下的原始图像。从两幅图像中可以发现,加狭缝后并没有使结果图像更精确,而且还降低了信号与背景的对比如度。

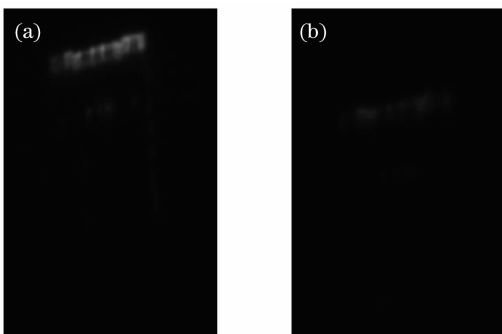


图 9 对比不加(a)和加(b)狭缝效果

Fig. 9 Comparion of images without (a) and with (b) streak cover

实验中发现,所采用的图像处理算法在条纹像的距离方向上仅选取最大值,导致一些能够提高空间分辨率的信息丢失。另外,相对较大的激光束散

角也是影响目标像在扫描方向上的空间分辨率的一个因素。较宽的束散角使激光束在平行于扇形光扫描方向(即目标的高度方向)上产生了不必要的展宽,导致目标上形成一个矩形的照射区域,这和理想状态下的线形照射区域有了很大差别。这种差异会通过接收镜头成像到条纹管光电阴极上。在光电阴极上被照亮的矩形区域里,既包含了目标的平面静态信息,也包含了想要分离出的距离信息。当这个矩形区域所产生的光电子通过偏转电压扫描时,对应着相同距离的光电子会偏转相同的角度。如果矩形中目标的距离是相同的,那么最后得到的图像也是一个规则的矩形。但如果矩形中有一个具有不同距离的 A 点,那么 A 点产生的光电子偏转角度就会不同,这种情况下, A 点能否被分辨出来主要由 A 点与目标周围的距离差和矩形在偏转方向上的宽度关系决定,若距离差小于矩形宽度对应的距离差,那么 A 点就很有可能不能被分辨出来,这种可能是由 A 点在矩形中的位置来决定的。因此,较宽的激光器束散角会导致距离分辨率下降。

5 结 论

用单狭缝条纹管搭建了可以进行线扫描操作的激光雷达成像系统,并且用这套系统对 702 m 建筑物目标进行了扫描成像实验,得到了条纹像,通过对条纹像和目标的对比,说明条纹像可以实现对目标距离等信息的提取,而且也得出可以实现小于 0.5 m 的远距离分辨率的判断。处理多幅条纹像得到目标的重构图像。分析了影响成像质量的几个实验条件。

参 考 文 献

- Li Qi, Wang Yongzhen, Wang Qi *et al.*. Noise suppression algorithm of coherent lidar range image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5):581~584
李 琦,王永珍,王 骐 等. 相干激光成像雷达距离像的噪声抑制算法研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5):581~584
- Li Qi, Wang Qi, Li Ziqin *et al.*. Image processing on CO₂ laser imaging radar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(9):826~828
李 琦,王 骐,李自勤 等. CO₂ 激光成像雷达图像处理分析[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(9):826~828
- Li Qi, Chi Xin, Wang Qi. Principle and technology of 3D lidar on a single pulse using geiger-mode APD arrays [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **12**(36):1116~1119
李 琦,迟 欣,王 骐. 基于盖革模式 APD 阵列的单脉冲 3D 激光雷达原理和技术[J]. *激光与红外*, 2006, **12**(36):1116~1119
- Asher Gelbart, Brian C. Redman, Robert S. Light *et al.*. Flash lidar based on multiple-slit streak tube imaging lidar [C]. *SPIE*, 2002, **4723**:9~18
- Andrew J. Nevis. Automated processing for streak tube

- imaging lidar data [C]. *SPIE*, 2003, **5089**:119~129
- 6 Anthony D. Gleckler, Asher Gelbart, James M. Bowden. Multispectral and hyperspectral 3D imaging lidar based upon the multiple slit streak tube imaging lidar [C]. *SPIE*, 2001, **4377**:328~335
- 7 Anthony D. Gleckler, Asher Gelbart. Three-dimensional imaging polarimetry [C]. *SPIE*, 2001, **4377**:175~185
- 8 Li Sining, Liu Jinbo, Guang Yuhao *et al.*. Maximum acquisition range calculation for multi-wavelength streak tube image lidar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6):106~109
李思宁, 刘金波, 广宇昊 等. 多波段条纹管激光成像系统探测距离计算[J]. *光子学报*, 2007, **36**(6):106~109
- 9 Wei Jingsong, Cheng Yuanli, Xu Qiang *et al.*. Imaging by single-slit streak tube laser lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4):496~500
魏靖松, 程元丽, 徐强 等. 单狭缝条纹管激光雷达的成像[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4):496~500
- 10 J. Sun, Q. Wang. 4-D image reconstruction for streak tube imaging lidar [J]. *Laser Physics*, 2009, **19**(3):502~504
- 11 Zang Junheng, Li Sining, Wang Qi *et al.*. Noise analyzing and processing of streak image for streak tube imaging lidar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8):1533~1538
臧俊恒, 李思宁, 王骐 等. 条纹管激光成像雷达条纹图像噪声分析与处理[J]. *光子学报*, 2008, **37**(8):1533~1538