

文章编号: 0258-7025(2008)04-0496-05

# 单狭缝条纹管激光雷达的成像

魏靖松 程元丽 徐 强 何曼泽 刘金波 李思宁 王 骥

(哈尔滨工业大学可调谐(气体)激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要** 介绍了一种新型激光三维成像方法,该方法用条纹管作为成像系统的接收端,使激光三维成像雷达具有高帧频、大视场角的特点。理论上介绍了该方法的成像原理,用实验验证了它对远距离目标的成像能力。建立了一套条纹管激光成像的演示系统,测定了系统中的关键参数,获得了室内、室外特定目标的条纹像。证实了这种条纹管激光三维成像方法的可行性。并对完善该套成像系统提出了自己的见解。

**关键词** 激光技术;条纹管;激光雷达;三维成像

**中图分类号** TN 958.98 **文献标识码** A

## Imaging by Single-Slit Streak Tube Laser Lidar

Wei Jingsong Cheng Yuanli Xu Qiang He Manze Liu Jinbo Li Sining Wang Qi

(National Key Laboratory of Tunable (Gas) Laser Technology,  
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

**Abstract** A new type of three-dimensional (3D) imaging laser radar is introduced. It uses streak tube as the receiver, which makes the radar have the peculiarities of high frame rate and wide range angle. The principle of this method is introduced theoretically. The imaging ability of this method to far distant object was demonstrated experimentally. A laser imaging demonstration system was established. Some key parameters were measured, and some specially objective streak image of indoor and outdoor were accessed. The method was proved to be available.

**Key words** laser technique; streak tube; laser radar; three-dimensional imaging

## 1 引言

激光三维成像技术近年来是激光应用技术中非常活跃的一个分支,激光的距离选通特性使激光三维成像方法具有其他二维成像方法所不具备的优势。但是传统激光成像的局限性也显而易见,那就是激光成像的视场小、成像帧率低。为了克服这个缺点,使激光三维成像雷达具有高帧频、大视场角的特点,近年来国际上提出了采用条纹管作为探测器实现激光三维成像的方案。本文在理论上探讨了这种方案的可行性,在实验上建立了一套条纹管激光成像的演示系统,对这种成像方案进行了演示论证,获得了室内、室外特定目标的条纹像。

利用购置的条纹管和激光器建立了一套激光三维成像的实验演示系统,包括作为发射机的灯抽运

Nd:YAG 激光器、条纹管探测器、发射和接收光学系统、光学触发器以及 CCD 数据读取处理部分。对系统关键部件的指标进行了测试,如接收系统径向和横向空间分辨率等,确认系统各性能指标满足成像系统分辨率等指标要求。实验上,设计、完成了对室内特定目标的成像,测试了系统近距离目标精确成像能力,取得了比较满意的结果。完成了对 300 m 远的目标成像,对获得的条纹像进行了还原,获得了目标的真实距离信息,验证了这一激光三维成像方案的可行性。

## 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<sup>[1]</sup>。

收稿日期:2007-09-02; 收到修改稿日期:2007-11-12

作者简介:魏靖松(1981—),男,黑龙江人,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:程元丽(1971—),女,蒙古族,副教授,主要从事 X 射线激光及等离子体诊断方面的研究。

E-mail:cy1-ice@hotmail.com

激光经过光学系统变换成为线光源照射到目标上,反射的回波信号由光学天线接收,聚焦到条纹管的狭缝上,单狭缝条纹管的一帧图像只能在选通区域内的目标的一个剖面轮廓成像,如图 1(a)所示。目标上不同距离的点的回波信号的行走时间

(Time of Flight, TOF)不同,通过光电转换后生成的电子在条纹管偏压部分受到的偏转电压也不同,因此在条纹管的屏幕上显示的是不同相对位置的条纹,如图 1(b)所示。利用条纹的相对距离就可以还原目标的剖面轮廓——距离像。

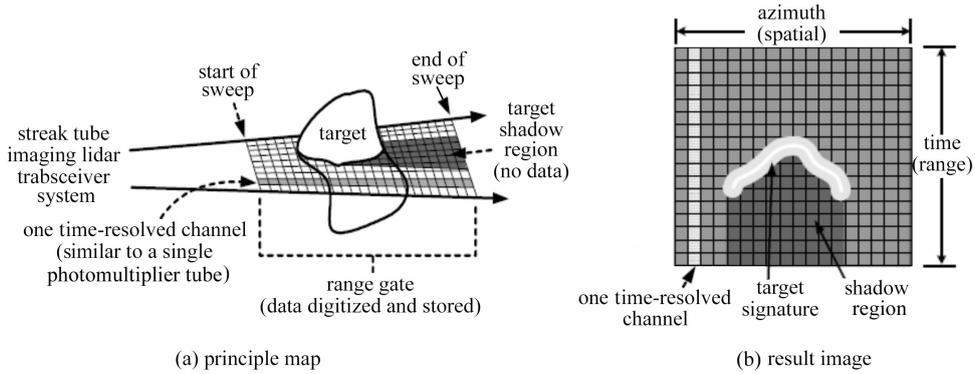


图 1 条纹管对目标三维成像原理

Fig. 1 Principle of 3D imaging of targets

表 1 分辨率板参数

Table 1 Parameters of resolution plate

Team	Parameter					
	1	2	3	4	5	6
-2	10.00000	8.90899	7.93701	7.07107	6.29961	5.61231
-1	5.00000	4.45449	3.96850	3.53553	3.14980	2.80616
0	2.50000	2.22725	1.98425	1.76777	1.57490	1.40308
1	1.25000	1.11362	0.99213	0.88388	0.78745	0.70154
2	0.62500	0.55681	0.49606	0.44194	0.39373	0.35077
3	0.31250	0.27841	0.24803	0.22097	0.19686	0.17538
4	0.15625	0.13920	0.12402	0.11049	0.09843	0.08769

## 3 实验

### 3.1 横向空间分辨率

采用分辨率测量的方法对系统的横向空间分辨率进行测量<sup>[2]</sup>。将平行光管出射的平行光入射到去掉条纹管光学系统的条纹管上,在入口处放置标准分辨率板(型号为 USAF-1951),光线透过标准分辨率板入射到条纹管内。条纹管处于静态非扫描状态,此时,在条纹管后的 CCD 上可以读取准分辨率板的图像。通过标准分辨率板的参数如表 1 所示。可以由文献[3]计算得到条纹管接收系统的静态空间分辨率为 7.13 pl/mm(线对/毫米)。

### 3.2 径向距离分辨率

将两个目标在离探测器同样距离上分开放置,它们的前表面距离探测器约 30 m。将另外一个目标靠近其中一个,并且距离它的受光面 10 cm 放置,实物图和静态图分别如图 2(a),(b)所示。

从实验结果图 2(c)中可以很明显的看出相邻

的两个目标存在距离差,在经软件处理后的图片图 2(d)也很明显地说明了这一点。经过测量,两个目标在 CCD 屏幕上纵向相差 20 pixel。综合结果图像和实际情况,可以判断,条纹管的最高分辨率小于 10 cm,可以满足对近距离目标精确成像的要求。

### 3.3 扫描电压线性度

在距离探测器 33.4 m 处依次放置了四个目标,目标放置及目标之间的纵向距离关系如图 3(a)所示,在未加扫描电压时得到的静态图像如图 3(b)所示。

从处理后的结果图 3(d)中选取每个目标所成像的最亮点,分别标记它们在垂直方向上的位置,得到的结果分别为 296,475,591,702,目标 1,2 和目标 2,3,目标 3,4 之间的距离比例为 1.61:1.05:1,和实际情况 900:600:600 基本吻合,最大误差度为 6.1%,说明条纹管电压线性度较好,能够准确地分辨目标间的距离差,满足成像的要求。

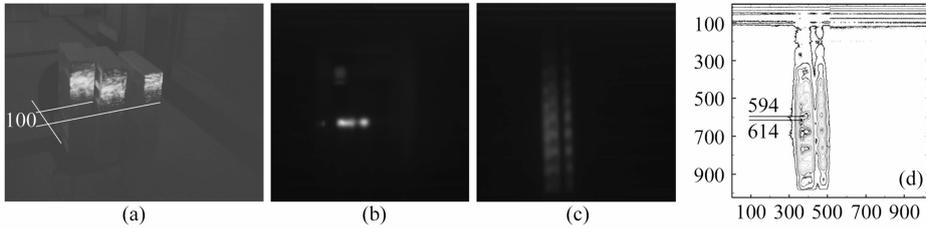


图 2 最小分辨率。(a) 目标实物图;(b) 静态图像;(c) CCD 图像;(d) 处理后图像

Fig. 2 Minimum resolution. (a) image of targets; (b) static image; (c) CCD image; (d) processing image

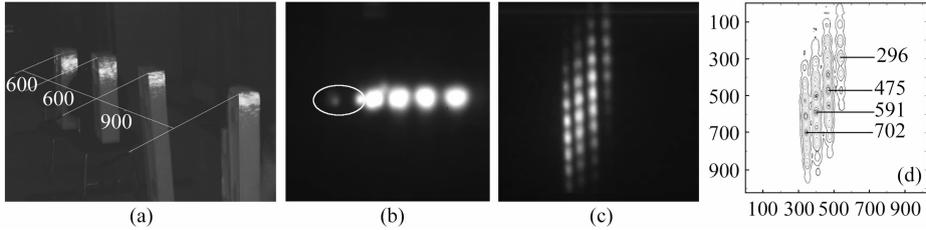


图 3 电压线性度。(a) 目标实物图;(b) 静态图像;(c) CCD 图像;(d) 处理后图像

Fig. 3 Linearity of voltage. (a) image of targets; (b) static image; (c) CCD image; (d) processing image

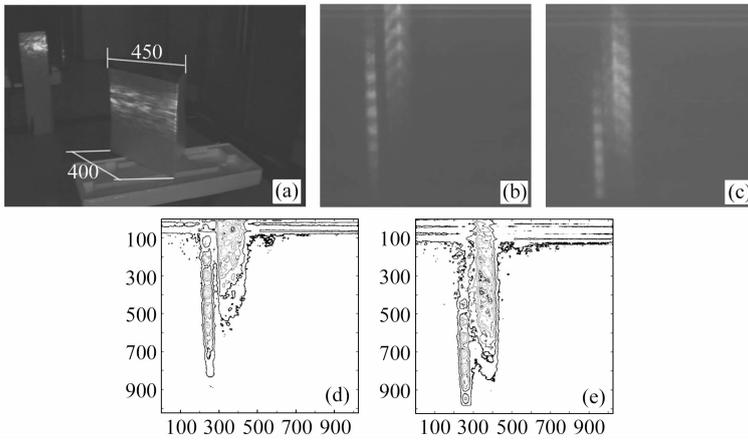


图 4 角形目标成像。(a) 实物图;(b) CCD 图像 1;(c) CCD 图像 2;(d) 处理后图像 1;(e) 处理后图像 2

Fig. 4 Angular imaging. (a) image of targets; (b) CCD image1;

(c) CCD image2; (d) processing image1; (e) processing image2

从图 3(b)中可以看到实际上有六个目标被拍摄到,但是在实验结果图 3(c)中,并没有见到其中的两个目标,说明条纹管具有距离选通特性。

### 3.4 目标表面形状成像实验

在距离探测器约 30 m 处放置待测的角形目标,它的横向宽度为 450 mm,纵向深度为 400 mm,在其后不远处放置一平板目标作为对比。摆放位置如图 4(a)所示。所得到的两幅图像如图 4(b),(c)所示。

在经过图像处理后发现,由于激光在横向辐照度不均匀,导致角形的两个向光面上照度不同,在软件处理时只能分辨出一侧,无法还原出角形的实际形状,如图 4(d),(e)所示。为此,将两幅图像按照

相应位置合成起来,变为一幅图像,如图 5(a)所示。然后再进行图像处理,处理后得到的图像如图 5(b)所示。

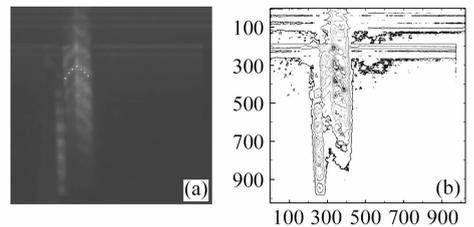


图 5 合成角形图像

(a) 合成 CCD 图像;(b) 处理后图像

Fig. 5 Image synthesis

(a) joined CCD image; (b) processing image

从图 5(a)中可以看出,左侧得到明显的一串向上的箭头形状图案,即角形目标的回波经过条纹管扫描后所成的图像。由于在条纹管电压高扫描速度的情况下,条纹管对时间差的分辨能力很高,会将 10 ns 宽的激光脉冲在屏幕纵向完全展开,而激光脉冲的调制特性会使激光在时间上产生亮度的起伏,所以会在屏幕上看到一串箭头的图像。箭头的顶端对应着面向探测器角形的尖端。

从图 5(b)同样可以看出,光强的分布也是具备这样一种形状的。

选择光强最强的一个箭头图案,沿着形状标记

7 个亮点,其中包括箭头两侧底端的两点和角形顶点。从图 5(a)中很容易看出,条纹管很好地重现了目标被照射位置的形状。

### 3.5 扫描成像实验

因为单狭缝条纹管每一次只能在一条线上对目标成像,所以通过单狭缝条纹管对整个目标成像必须通过线扫描的方式来完成。

实验的目标是一个铁皮文件柜,将其中一个柜门打开,用扩束后的激光在垂直地面的方向扫描照射铁柜。得到的铁柜上下三层结果图像和软件处理图像如图 6 所示。

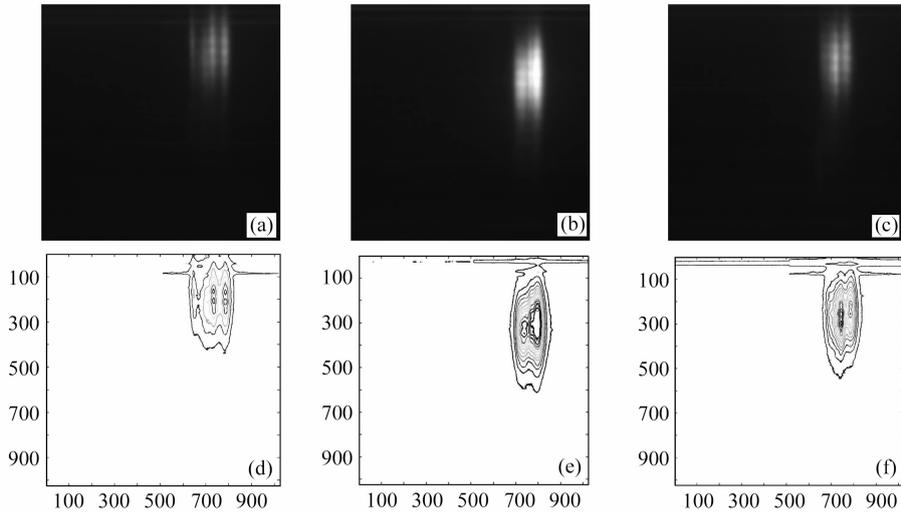


图 6 扫描铁柜结果图像和处理后图像。(a) 顶层 CCD 图像;(b) 中层 CCD 图像;(c) 底层 CCD 图像;(d) 顶层处理后图像;(e) 中层处理后图像;(f) 底层处理后图像

Fig. 6 Results and processed images. (a) top layer CCD image; (b) middle layer CCD image; (c) bottom layer CCD image; (d) top layer processing image; (e) middle layer processing image; (f) bottom layer processing image

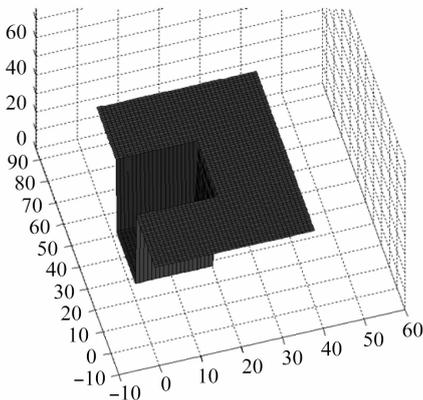


图 7 文件柜重构图像

Fig. 7 Image of document cabinet reconstruction

经过计算,得到顶层、底层为一平面,中层两个平面的距离差为 382 mm,这代表了中层其中的一个柜门和旁边的一个打开的柜门之间在光线传播方向

的距离差,结果和实际情况 380 mm 刚好吻合。经过还原后得到的仿真图像如图 7 所示。

### 3.6 远距离目标探测实验

通过理论计算,当目标放置在距离成像系统 300 m 时,目标散射回波到达探测器光阴极的能量密度为  $1.7 \times 10^{-10} \text{ J/mm}^2$ ,高于最小可探测能量密度  $10^{-15} \text{ J/mm}^2$ ,所以,目标在 300 m 处可以被探测到。

如果将  $1 \text{ m}^2$  的目标变为大范围的目标,比如对地貌成像,可以推断出,该套系统也可以探测到地貌信息。

在距离探测器 280 m 处放置目标 1,在其右后方 18.2 m 和 26.0 m 处分别放置目标 2 和目标 3,如图 8(a) 所示。所成结果图像如图 8(b) 所示。从得到的结果可以看出成像系统可以探测到 300 m 远的

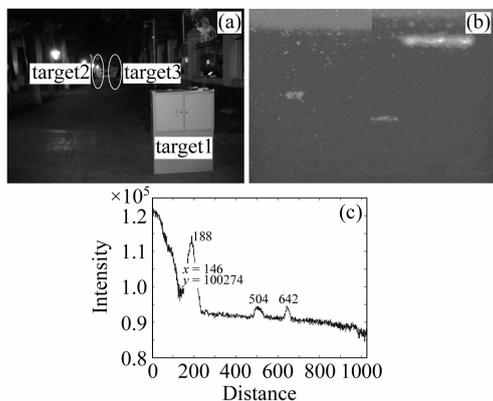


图 8 280 m 目标成像。(a) 目标实物图;  
(b) CCD 结果图像;(c) 回波能量分布图

Fig. 8 Imaging of 280 meters target. (a) image of targets; (b) CCD image; (c) image of energy distribution target, verified the theoretical calculation about the long distance detection capability.

## 4 结 论

通过对条纹管三维成像系统的理论计算,说明该套系统可以应用于对远距离目标成像,并且通过实验验证了这一理论。测定了系统中关键设备的参

数,测得条纹管电压线形度误差在 6% 左右,近场最小分辨率小于 10 cm。并由此说明了整套系统可以应用于对近距离(30 m)目标精确成像。在激光三维精确成像领域有着重要的研究价值。

在实验过程中,发现激光脉冲能量的时间分布和光斑能量的空间分布对整个系统的成像质量和纵向位置判断的准确性有着很大的影响。现有的激光器无法满足对目标成强度像的要求,对目标成距离像也有一定的影响。对于这个问题,提出的解决方案是,改善激光器的时间特性,在激光器前加入光束整形系统,调整激光光斑的均匀空间分布。

## 参 考 文 献

- 1 A. Gelbart, B. C. Redman, R. S. Light *et al.*. Flash lidar based on multiple-slit streak tube imaging lidar [C]. *SPIE*, 2002, **4723**:10~12
- 2 Li Sining, Wang Qi, Liu Jinbo *et al.*. Experimental research on resolution of streak tube imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):1023~1026  
李思宁,王 骐,刘金波 等. 条纹管激光成像系统空间分辨率实验研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):1023~1026
- 3 Sining Li, Qi Wang, Jinbo Liu *et al.*. Research of range resolution of streak tube imaging system [C]. *SPIE*, 2007, **6279**:62790C