

文章编号: 0253-2239(2007)06-1023-4

# 条纹管激光成像系统空间分辨力实验研究\*

李思宁 王 骥 刘金波 广宇昊 李慧子

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150080)

**摘要:** 简要分析了非扫描激光成像的技术优势,介绍了利用条纹管实现非扫描激光成像的工作原理,说明了图像空间分辨力与系统距离精度的对应关系。对影响图像空间分辨力的主要因素进行了理论分析,得到了系统总空间分辨力与各单元器件空间分辨力和放大倍率的对应关系,在此基础上,对现有条纹管成像系统进行了相应的计算,得到了空间分辨力的理论预期值;最后,提出了一种基于分辨力板成像的系统空间分辨力测试方法,设计了相应的验证实验,对实测图像进行了去噪处理和数据分析,得到了图像的衬比度传递函数(CTF)曲线,通过衬比度传递函数分析,计算出了成像系统的实际空间分辨力,并将实测的分辨力数据与理论值进行了对比分析。

**关键词:** 激光成像; 空间分辨力; 条纹管; CCD; 衬比度传递函数

中图分类号: TN249 文献标识码: A

## Experimental Research on Resolution of Streak Tube Imaging Lidar

Li Sining Wang Qi Liu Jinbo Guang Yuhao Li Huizi

(Institute of Optoelectronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080)

**Abstract:** The advantages of scannerless lidar and the operating principle of streak tube imaging lidar are introduced; the relationship between range resolution and spatial resolution is expounded. Based on analysis of the key factors that influence the spatial resolution of streak tube imaging lidar, the equation to calculate the overall spatial resolution is founded, and corresponding mathematical analyses are also made to predict the performance, finally, by means of resolution panel, we set up experiment to validate the spatial distinguishing ability of the system and get the raw resolution image and process the image by noise filtering. Through calculation of the contrast transfer function, we get the practical spatial resolution data and make performance analysis by comparing the practical data with theoretical data.

**Key words:** imaging lidar; spatial resolution; streak tube; CCD; contrast transfer function

## 1 引 言

激光成像技术能够直接获取目标四维像(三维几何像+强度像),在航天和军事领域有很高的应用价值。但是,传统的激光成像技术采用扫描成像体制,成像帧频低、视场角也较小,限制了其应用<sup>[1~3]</sup>;因此,近年来国际上主要研究机构一直在探索实现非扫描激光成像技术,这其中,条纹管激光成像技术是目前公认的最有希望实用化的三种主要技术体制之一<sup>[4]</sup>。

条纹管激光成像系统的原理是通过测量短脉冲激光在发射机与目标之间的往返时间,来还原出目标的距离像,它被认为是一项十分有前途的激光雷达技术方案,具有距离精度高(小于 5 cm)、方位视

场角大(大于 30°)、空间分辨力高(高于 512 pixel)等优点<sup>[5~7]</sup>。

相对于其它成像技术而言,激光成像技术的最大优势在于其能够获取目标的距离像,因此,距离精度是一个重要的系统指标,而在条纹管激光成像系统中,距离分辨力对应于成像系统的空间分辨力,这方面的理论分析和实验方法研究对于系统设计工作十分重要<sup>[8]</sup>。

## 2 条纹管激光成像器系统组成与工作 原理

图 1 为系统组成示意图,具体的工作过程如下:由发射系统中 Nd:YAG 激光器发射的激光,经过倍

\* 哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助课题。

作者简介:李思宁(1968—),男,黑龙江哈尔滨人,朝鲜族,副教授,主要从事激光成像雷达技术研究。

E-mail: siningli@sina.com

收稿日期: 2006-08-08; 收到修改稿日期: 2006-12-08

频获得 532 nm 激光输出,经过光学系统光束变换,成扇形激光向目标发射;经目标反射的回波信号进入接收系统,由接收光学系统聚集耦合到探测器条纹管的光电阴极上,条纹管的输出屏上的像由电荷耦合器件(CCD)读出系统将数据读出并输到信号处理系统。信号处理系统对图像进行还原重构,并进行噪声处理和目标提取等算法。

整个探测系统的核心是条纹管探测器,其工作原理如图 2 所示,反射的回波信号由接收光学系统聚焦到条纹管的光电阴极上,条纹管在横向方向上

可以分成多个时间分辨的通道,条纹管通过内部的电子偏转系统,可以对不同时间到来的回波信号进行偏转,最后在条纹管的屏幕上显示不同相对位置的条纹,利用屏幕上条纹的相对位置就可以分辨出目标的距离信息。另外还可以根据目标表面的反射率的不同得到目标的强度信息。这样在条纹管的荧光屏上就可以得到目标的距离-强度-方位角的图像信息,并由耦合在条纹管荧光屏上的 CCD 图像读出系统读出。目标输出图像中每行代表不同时间的条纹图像,每列代表一个可时间分辨的通道。

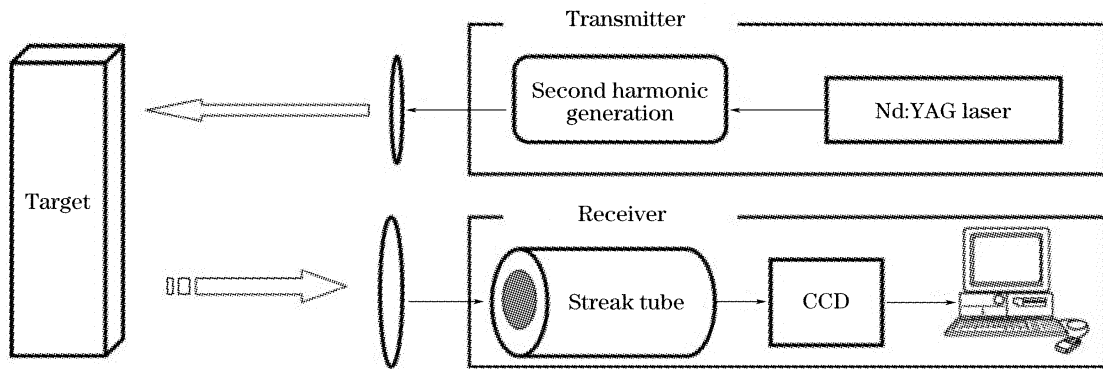


图 1 条纹管激光成像器系统组成

Fig. 1 Schematic diagram of streak tube imaging lidar

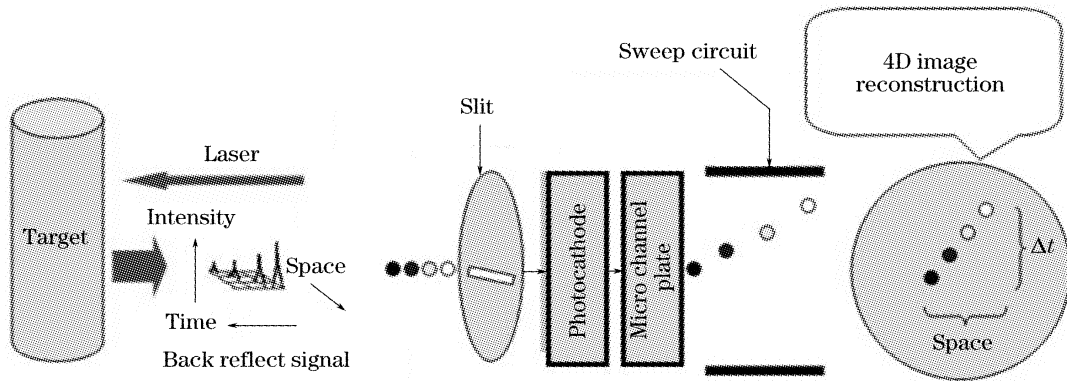


图 2 条纹管激光四维成像技术原理图

Fig. 2 Four-dimensional operating principle of streak tube imaging lidar

由条纹管激光成像系统的工作原理可以看出,目标的距离信息首先转换为回波信号的时间信息,即回波的时间先后,然后又通过条纹管转换为条纹像的空间信息,因此,条纹管成像系统的空间分辨力与系统的距离精度有着对应关系。

### 3 空间分辨力理论分析

对于条纹管激光成像系统来讲,接收系统的空间分辨力主要由条纹管、光纤面板、增强器、CCD 的分辨力所决定,它们之间的关系由随机误差定理决定<sup>[9]</sup>:

$$\frac{1}{N^2} = \frac{1}{\beta_T^2 N_T^2} + \frac{1}{\beta_F^2 N_F^2} + \frac{1}{\beta_E^2 N_E^2} + \frac{1}{\beta_L^2 N_L^2} + \frac{1}{\beta_{CCD}^2 N_{CCD}^2}$$

式中  $N$  为接收系统整机的空间分辨力;  $N_x$  为  $x$  器件的空间分辨力;  $\beta_x$  为  $x$  器件相对于条纹管光电阴极处的放大倍率; 下标 T、F、E、L、CCD 分别代表条纹管、光纤面板、增强器、耦合透镜组、CCD。

我们使用的条纹管静态空间分辨力优于 25 lp/mm,放大率为 2。

另外,我们首先对实验中采用的 OK 系列 CCD 相机的空间分辨力进行了实验测量,CCD 相机的空间分辨力取决于单个像元的尺寸,其极限空间分辨力为 47.3 lp/mm。CCD 相对于条纹管光电阴极处

的放大率为： $S_{CCD}/S_{cathode}=0.26$ 。

经过精确调试的耦合透镜组的空间分辨力可以达到很高,对整机空间分辨力的影响可以忽略。此原理样机用于实验室理论验证阶段,探测距离远小于 1 km,则回波信号远大于条纹管的最小可探测能量阈,因此可以使用没有像增强器耦合的 CCD;另一方面通过光纤面板耦合的像增强器 CCD 造价很高,这也是没有使用像增强 CCD 的一个原因。因而此处可以不考虑像增强器和光纤面板对整个信号接收系统的影响。

利用公式和系统中各器件的空间分辨力及放大率,可以估算出整个信号接收系统在可见光波段(光

电阴极峰值处)的空间分辨力为 11.9 lp/mm。

### 4 条纹管系统空间分辨力测量实验

我们采用分辨力板测量的方法对系统的空间分辨力进行了测量。如图 3 所示,在条纹管的光电阴极处贴分辨力板,用接收机观察分辨力板,找出接收机所能区分的最细一组直线所对应的分辨力值,则可认为接收机的静态空间分辨力值优于此数值。

图 4 为 CCD 拍摄的条纹管输出屏上的分辨力板图像。为了减少在计算中的噪声干扰,需要对采集的图像进行降噪处理。对 CCD 抓取的多幅空测图像取平均,通过实测图像的亮度减去空测图像的亮度,即可去除背景噪声。

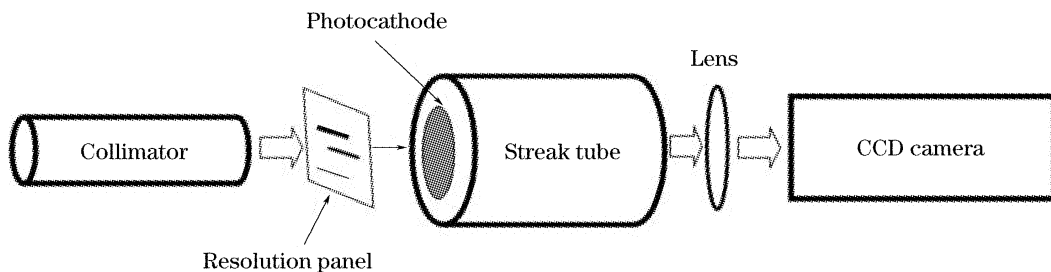


图 3 接收系统空间分辨力测试实验方案

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup to test spatial resolution of receiving system

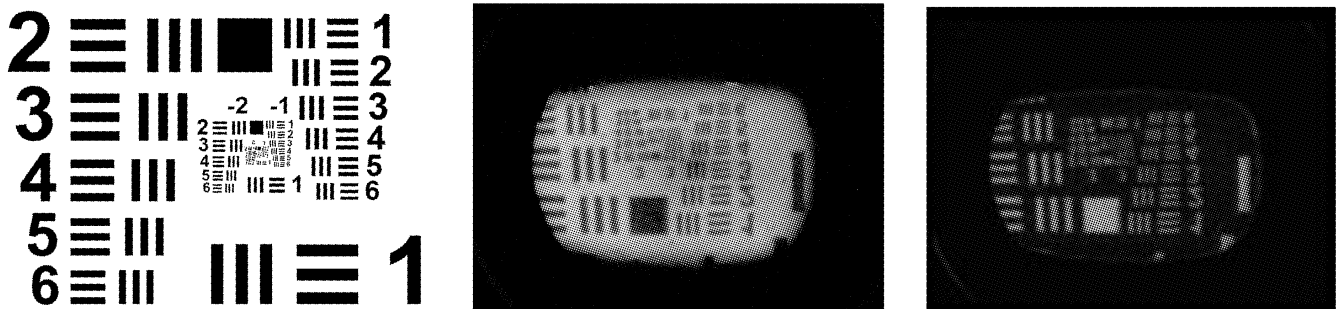


图 4 空间分辨力实验测量结果

Fig. 4 Experimentally measured results of spatial resolution

图 5 是用接收机测到的分辨力板光强分布曲线。

空间测量值可以用下面的公式进行计算：

$$L_{P\text{measure}} = (L_{P\text{resolving}}) \times (L_{\text{resolving}}/L_{\text{measure}}),$$

式中  $L_{\text{resolving}}$  为分辨力板上的线对长度; $L_{\text{measure}}$  为线对长度的测量值。衬比度传递函数  $f_{CTF}$ <sup>[10]</sup>：

$$f_{CTF} = C_{\text{image}}/C_{\text{object}}.$$

图像的衬比度为光强度分布曲线上极大值与极小值之差与极大值与极小值之和的比,用以下公式表达为：

$$C = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}})/(I_{\text{max}} + I_{\text{min}}),$$

分辨力板的衬比度近似为 1,则图像的衬比度

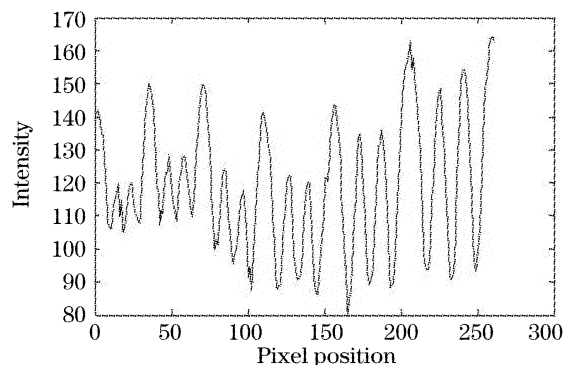


图 5 分辨力板第一组线对的光强分布曲线

Fig. 5 The intensity curve of image (1st group) of resolution power test target

$C_{\text{image}}$  近似等于  $f_{\text{CTF}}$ 。

由以上公式计算的系统空间分辨力测量值  $L_{\text{Pmeasure}}$  和衬比度传递函数  $f_{\text{CTF}}$  如表 1 所示。

表 1 接收机空间分辨力测量值及  $f_{\text{CTF}}$

Table 1 The value of spatial resolution and  $f_{\text{CTF}}$

Line pair (group)	$L_{\text{Pmeasure}}/(\text{lp/mm})$	$f_{\text{CTF}}$
[1,6]	10.5	0.07
[1,5]	9.4	0.08
[1,4]	8.4	0.16

在观察图像时,衬比度低于 0.1 的图像人眼不能识别,设衬比度 0.1 对应的空间分辨力为截止分辨力。据此可以认为接收系统的静态空间分辨力优于 8.4 lp/mm。

## 5 结 论

利用分辨力板能够测量系统的总空间分辨力,结合扫描电路的定标,最终能够确定条纹管激光成像系统的距离精度。

实验测量的结果与理论分析的估算值进行比较发现,实验测出的结果比估算值要低。造成这种差别的主要原因是,在估算过程中没有考虑各器件间耦合对系统空间分辨力造成的损失,同时也忽略了入射、出射中继透镜组对系统空间分辨力的影响。

## 参 考 文 献

1 Li Qi, Wang Yongzhen, Wang Qi *et al.*. Noise suppression algorithm of coherent ladar range image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 581~584 (in Chinese)

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

2 Li Qi, Wang Qi, Li Ziqin *et al.*. Imag processing on CO<sub>2</sub> laser imaging radar[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(9): 826~828 (in Chinese)

李 琦,王 骐,李自勤 等. CO<sub>2</sub> 激光成像雷达图像处理分析[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(9): 826~828

3 Ziqin Li, Qi Li, Zhaoshuo Tian *et al.*. Processing for laser radar range images[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(4): 210~212

4 Li Sining, Liu Jinbo, Li Huizi *et al.*. Modification of lidar equation in large field of view[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(suppl): 108~110 (in Chinese)

李思宁,刘金波,李慧子 等. 大视场情况下激光雷达距离方程的修正[J]. *中国激光*, 2006, **33**(suppl): 108~110

5 Anthony D. Gleckler, Asher Gelbart, James M. Bowden. Multispectral and hyperspectral 3D imaging lidar based upon the multiple slit streak tube imaging lidar[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4377**: 328~335

6 Anthony D. Gleckler, Asher Gelbart. Three-dimensional imaging polarimetry[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4377**: 175~185

7 Andrew J. Nevis. Automated processing for streak tube imaging lidar data[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5089**: 119~129

8 Li Ziqin, Wang Qi, Li Qi *et al.*. Noises mechanism of range image in coherent laser radar and the range anomalies suppression [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(3): 356~360 (in Chinese)

李自勤,王 骐,李 琦 等. 相干激光雷达距离像噪声机理及距离反常抑制[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 356~360

9 Li Bingqian, Wang Yongchang, Zhang Xiaoqiu *et al.*. Time and spatial resolutions of streak camera [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1997, **18**(6): 405~410 (in Chinese)

李炳乾,王永昌,张小秋 等. 紫外/ 可见皮秒条纹相机时空分辨率[J]. *半导体光电*, 1997, **18**(6): 405~410

10 Wang Li, Tian Weijian. Study on fiber optic taper coupled with CCD for improving the imaging resolution of CCD sensor[J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2004, **17**(3): 21~25 (in Chinese)

汪 丽,田维坚. 光锥 CCD 耦合器件对提高 CCD 成像分辨率的探讨[J]. *光电子信息技术*, 2004, **17**(3): 21~25