

条纹管失真效应分析及其对多狭缝成像的影响

刘金波 李思宁 广宇昊 赵代民 王 骥

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 设计了一套多狭缝(MS)条纹管成像系统。在成像过程中,激光经扩束之后照射到目标上,目标的反射光经过接收系统聚焦在光纤图像变换器上,将面图像变换为线图像后,耦合到条纹管光电阴极上,在条纹管的偏转电压作用下,对不同距离目标回波信号进行不同程度的偏转,再经过图像的还原,获得不同目标的距离像。在图像的还原过程中,条纹管在荧光屏上的成像失真问题严重影响图像的恢复能否成功。对条纹管成像失真原因及其对图像还原的影响进行了分析,模拟了条纹像出现不同失真时对图像还原的影响,结果表明,条纹图像的拉伸达到 5% 左右或者局部倾斜达到 0.5% 时即可对目标图像的还原造成明显的影响。

关键词 激光技术; 激光成像; 多狭缝条纹管; 失真; 图像变换

中图分类号 TN249 文献标识码 A

Distortion of Streak Tube and Its Effect to Multiple Streaks-Streak Tube Imaging Lidar

Liu Jinbo Li Sining Guang Yuhao Zhao Daimin Wang Qi

(Institute of Optoelectronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract A flash imaging lidar system based on multiple streaks (MS)-streak tube was designed. In the imaging process, the laser beam after expanding was irradiated on the target, and the light reflected by the target was focused on the fiber image transformer through receiving antenna. The line images transformed from plane image will be coupled to the photocathode of streak tube through an optical taper. The photoelectrons excited by the line images are accelerated and deflected by the deflecting voltage; And then they were imaged on the phosphor of the streak tube and captured by a CCD camera. In order to remap the line images to area image, the distortion effect of streak tube must be corrected, for it will seriously affect the final image remapping. The reason and effect of the distortion is analyzed in this paper. Distortion of streak image and its effect to image remapping is simulated. The results show that 5% elongated or 0.5% local dip will seriously influence the remapped quality of target image.

Key words laser technique; laser imaging; multiple streaks-streak tube; distortion; image remapping

1 引 言

利用条纹管技术成像是一种新型的非扫描成像技术,条纹管激光成像雷达(Streak tube imaging lidar, STIL)是 20 世纪 90 年代后期,美国提出的一种无人载激光成像技术^[1-3]。1989 年,美国的 F. K. Knight^[4]首先演示了用单狭缝条纹管实现 16 pixel×16 pixel 像素成像的激光雷达系统。

随着条纹管成像技术的不断向前发展^[5,6],又在单狭缝条纹管激光雷达技术的基础上发展出多狭

缝条纹管激光雷达技术,而多狭缝条纹管激光雷达又可分为多狭缝偏振探测条纹管激光雷达,多光谱条纹管激光雷达和多狭缝条纹管非扫描闪烁式成像激光雷达^[7]。

本文涉及的是闪烁式多狭缝条纹管非扫描激光雷达,它能够实现闪烁式非扫描成像,具有成像频率高距离分辨力强的优点。在多狭缝条纹管成像雷达中,条纹管对目标成像的失真严重影响到成像的效果,本文简要分析失真的产生原因及其对图像还原

作者简介: 刘金波(1981—),男,河南人,博士研究生,主要从事激光主动成像雷达技术方面的研究。

E-mail: lionboo@sina.com

导师简介: 王 骥(1942—),男,黑龙江人,教授,博士生导师,主要从事激光主动成像雷达技术、小型化 X 光激光技术、EUV 光刻光源等方面的研究。E-mail: qiwang@hit.edu.cn

造成的影响。

2 系统原理

自行设计的多狭缝条纹管闪烁式非扫描成像雷达系统主要由发射源,发射光学系统,接收光学系统,光纤图像变换器与光锥,条纹管,CCD 相机及数据处理部分组成。具体工作原理如图 1 所示。

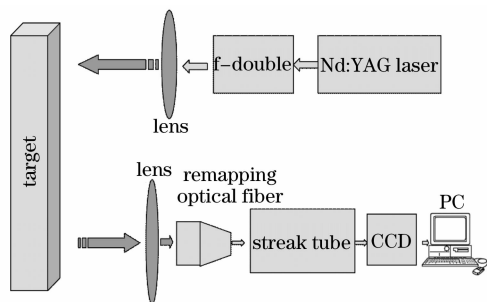


图 1 多狭缝条纹管激光雷达工作原理

Fig. 1 Principle of MS-STIL

系统具体工作原理为:倍频的 Nd:YAG 激光器输出 532 nm 的激光,经发射系统扩束后照射到目标上并覆盖整个目标区域,目标反射的信号光被接收系统聚焦后成像在置于焦平面的光纤图像变换器(图 2)的输出端上。光纤图像变换器把目标图像离散化,通过光纤排列方式的变化把目标图像变换成狭缝像,然后与光锥耦合,经过适当比例缩小后,耦合到条纹管的光电阴极上。由于条纹管能够对入射光线性放大并在扫描模式下沿时间轴方向展开,因此在条纹管的扫描模式下,能够同时获得目标的强度像和距离像。条纹管后方的荧光屏上获得的图像由微光 CCD 获取并经采集卡转化为数字信号。数字图像经过适当预处理,校正失真后,线图像上各点的灰度就代表了各个像素的强度像,依据距离一时间反演算法可以反演得到线图像上各个像素代表的

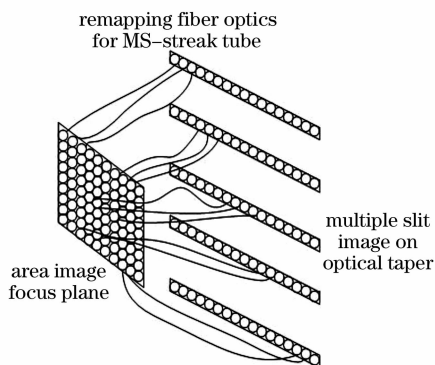


图 2 光纤变换器原理图

Fig. 2 Remapping fiber optics

目标距离,最后经过图像变换还原得到目标的距离像和强度像。

由于条纹管输出的图像是多条条纹像,是目标图像离散化之后重新排列的图像,因此必须依据光纤图像变换器对目标图像离散重排的规律对这些条纹像进行反变换,称之为还原,才能获得目标的真实图像。但是在条纹管对各个狭缝像成像的过程中,不可避免会造成各狭缝像的失真,这对图像的还原带来了困难。

3 条纹管造成图像失真的原因

条纹管对入射光成像过程是一个光-电-光的转换过程,透过内部的电子光学系统,对入射光产生的光电子进行聚焦,使不同位置入射的光产生的光电子最终入射到荧光屏上相应的位置。条纹管的电子光学系统一般由光电阴极、加速栅网、聚焦系统、阳极、偏转板和荧光屏组成,结构图如图 3 所示。

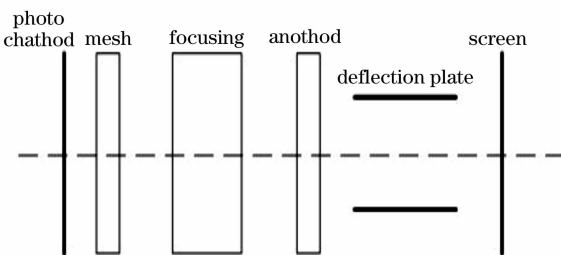


图 3 条纹管电子光学系统结构图

Fig. 3 Composition of streak tube electron optical system

与光学成像系统一样,电子光学系统在对光电子聚焦成像过程中,同样会产生各种像差,综合来看,电子光学系统的像差可以分为两类:

1) 场性质造成的误差:机械像差(电极形状误差、装配误差等),外电磁场干扰和几何像差(球差、慧差、像散、场曲、畸变等),前两种是电磁场不满足轴对称条件,后者是源于不满足近轴条件;

2) 电子束性质造成的误差:色差和空间电荷像差,他们分别是由电子初速度不一致(场对不同初速度的电子产生不同折射)和电子束电流密度较大(电子之间互相排斥)引起的。

本文重点关注条纹管的几何像差,因为在图像的处理过程中,需要将条纹像通过还原算法还原成平面像。本系统对图像的分辨能力即清晰度并不十分敏感,而条纹管成像的畸变,会对图像的恢复过程造成十分明显的影响,严重情况下甚至会造成图像还原的失败。几何像差的种类及其成因主要有

1) 球差:物点在轴上,但是电子束很宽(张角很

大),即透镜场的边缘折射率较中心大,因此通过场边缘部分的电子与近轴电子在轴上有不同交点;

2) 慧差:物点离轴近,电子束宽,即射线束与轴倾斜一角度,射线的对称性被破坏,通过透镜边缘部分的电子不会聚在近轴像点上;

3) 像散和场曲:电子束窄,但物体离轴相当远;

4) 畸变:电子束很窄,但物点离轴很远,即透镜的放大率不均匀,放大率与各点的离轴距离有关。

在条纹管成像过程中,电子放大率一般随离轴距离的增大而增大,于是图像的失真主要表现为枕

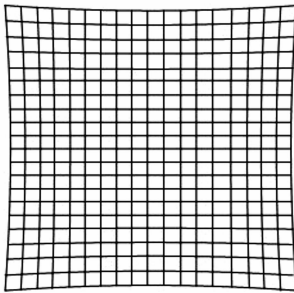


图4 枕形失真示意图

Fig. 4 Pincushion distortion sketch

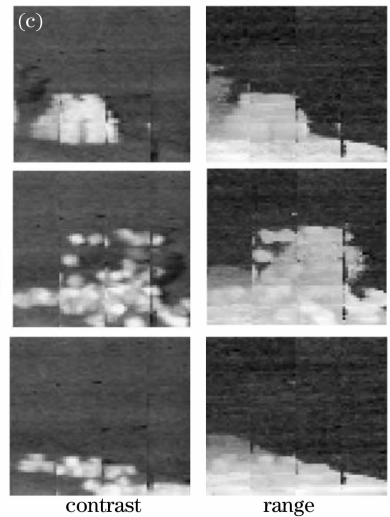
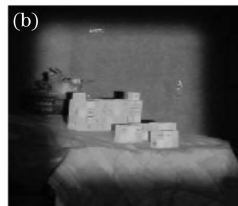


图5 坦克模型移动过程中三次闪光获得距离和强度像

Fig. 5 Three group ranges and intensity images of a moving tank model

从图5可以看出,在还原获得目标图像中,可以明显看到图像拼接的痕迹,而且已经对目标图像的质量造成了影响,它不但影响成像的空间分辨率(强度像),同时也影响成像的距离分辨率(距离像)。对这种影响进行模拟,表明很小角度的倾斜或者各条纹像的横向放大率不一致都会带来明显的影响(图6),因此寻找适当的办法来测量并修正这种失真就显得十分必要。

形失真(图4),它是畸变的一种。实际上图像的各种几何像差总是同时存在的,对条纹管的电子光学系统进行改进,可以改善成像质量,但是仍不能完全消除这种畸变,蒙特卡罗方法可以模拟光电子的特征运动轨迹,但条纹管带来的图像畸变以及图像改善的效果仍然要以实际试验为准。

4 图像失真对图像恢复的影响

多狭缝条纹管闪烁式非扫描成像系统中关键的核心器件主要是光线图像变换器和多狭缝条纹管,由于多狭缝条纹管成像系统中光纤变换器对目标面图像离散化并重新排列成条纹像,因此后续的图像处理过程中就需要将条纹像还原为目标面图像,理想情况下,这种图像的变换与还原可以通过对获得的图像进行矩阵变换获得。但条纹管造成条纹像的失真和畸变致使不能够直接对获取的图像进行图像变换以获得目标面图像。2002年美国亚利桑那州的Arete associate实验室的成像实验也证明了这一点^[8]。图5是他们对室内目标成像获得的试验结果。

5 图像失真对距离像的影响

图像的失真除了对多狭缝条纹管激光雷达的图像恢复造成严重影响外,还对获得距离像的精度造成影响,以枕形失真对距离精度的影响为例,做一简单分析。

假设条纹管造成的系统的枕形失真度为 β ,条纹管的时间分辨率为 δ ,条纹管成像的有效图像宽度为 L ,则枕形失真造成的一条条纹像上不同像素

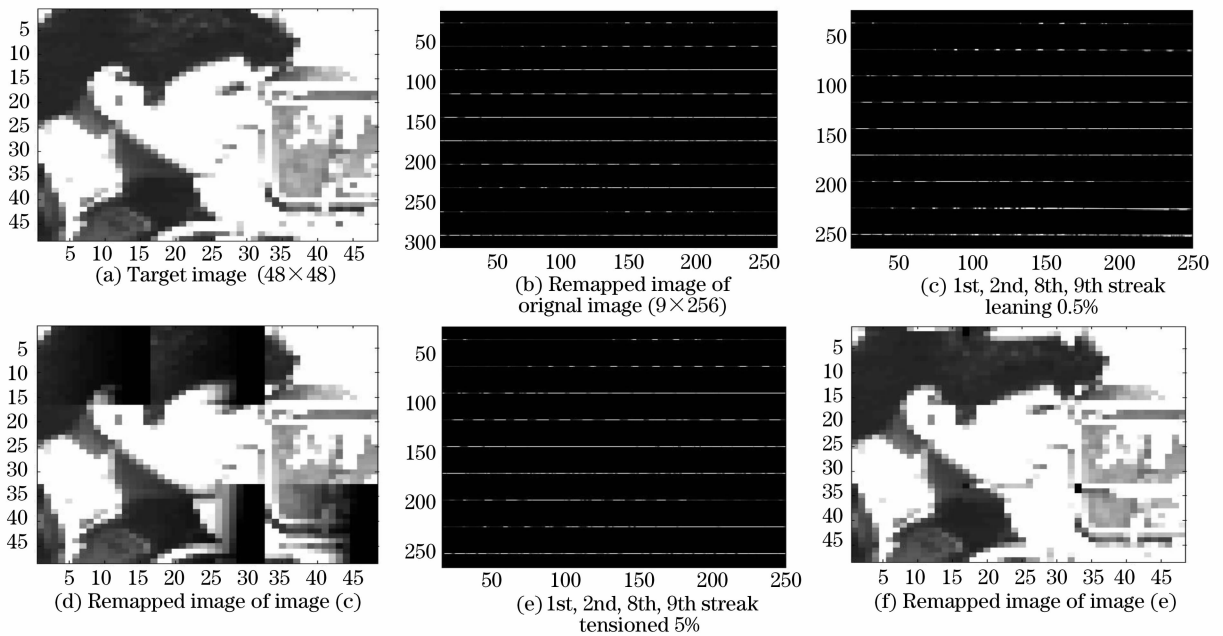


图 6 条纹管失真对图像还原造成影响

Fig. 6 Effect to remapping image of streak tube distortion

点之间在时间轴方向上的最大误差为

$$\Delta_{\max} = L \times \beta, \quad (1)$$

对应的时间误差为

$$\Delta_t = \Delta_{\max} \times N \times \delta = L \times \beta \times N \times \delta, \quad (2)$$

式中 N 为条纹管的空间分辨率, 单位为 lp/mm。

由此造成的测距误差为

$$\Delta_R = C \times \Delta_t / 2 = C \times L \times \beta \times N \times \delta / 2, \quad (3)$$

式中 C 为光速。假设图像的枕形失真度为 5%, 条纹管的空间分辨率为 $N=10$ lp/mm, 时间分辨率为 500 ps, 有效成像宽度为 20 mm, 则由(3)式可以求得此时距离像的最大误差为 $\Delta_R=0.75$ m。对于条纹管激光成像系统, 距离像的精度可以达到条纹管的时间分辨极限甚至更高, 对于以时间分辨率为 500 ps 的条纹管为探测器搭建的成像系统, 距离精度可以达到厘米量级。因此这样大的距离误差是不可忍受的, 必须进行相应的修正。

6 结 论

仿真分析的结果, 条纹管造成的图像失真对多狭缝条纹管成像系统的影响十分明显, 有必要采用适当的方法来测量条纹管的失真效应, 并据此对获得的原始图像进行修正。由于目前本系统使用的多狭缝条纹管还没有制作完成, 因此还不能实际测量

它的失真效应, 但是对图像失真的测量, 以及采用适当的算法来对图像进行修正, 将是系统后期图像处理中十分重要的一环。

参 考 文 献

- 1 R. L. Gustavson, T. E. Davis. Diode-laser radar for low-cost weapon guidance[C]. *SPIE*, 1992, **1633**: 21~32
- 2 J. Sackos, B. Bradley, B. Nellums *et al.*. The emerging versatility of a scannerless range imager[C]. *SPIE*, 1996, **2748**: 47~60
- 3 R. O. Nellums, R. D. Habbit, M. R. Heying *et al.*. 3D scannerless lidar for orbiter inspection[C]. *SPIE*, 2006, **6220**: 1~17
- 4 F. K. Knight. Three-dimensional imaging using a single laser pulse[C]. *SPIE*, 1989, **1103**: 174~189
- 5 Sun Jianfeng, Li Qi, Lu Wei *et al.*. Implementing the algorithm of target recognition for laser imaging radar based on digital signal processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1467~1471
孙剑峰, 李琦, 陆威等. 基于数字信号处理器的激光成像雷达目标识别算法实现[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1467~1471
- 6 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力实验研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1023~1026
- 7 A. D. Gleckler, A. Associates. Multiple-slit streak tube imaging lidar (MS-STIL) applications[C]. *SPIE*, 2000, **4035**: 266~278
- 8 A. Gelbart, B. C. Redman, R. S. Light *et al.*. Flash lidar based on multiple-slit streak tube imaging lidar[C]. *SPIE*, 2002, **4723**: 9~13