

文章编号 1004-924X(2016)增-0001-05

多狭缝条纹管激光成像雷达

周 鑫^{1*}, 姜 鹏², 孙剑峰¹, 王 骐¹

- (1. 哈尔滨工业大学 光电子技术研究所 可调谐(气体)激光技术重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 北京机电工程研究所, 北京 100074)

摘要:为了提高多狭缝条纹管的成像性能,利用改进的光锥和多狭缝条纹管搭建了一套激光成像雷达实验系统。光锥的光纤排布方式由前端的 128×32 转变为后端的 8×512 ,从而将平面像转变为 8 行线状条纹像,实现了探测器对视场的有效探测。系统的激光波长为 532 nm,成像像元数为 128×32 ,空间分辨率 < 0.3 mrad,可进行全天候工作。利用该装置完成了外场建筑物目标成像实验,分别获得了 1.7 km 目标的无扫描成像结果以及 720 m 目标的扫描成像结果。实验结果表明,所研制的激光成像雷达能够获得远距离目标的激光图像,强度像可较好地展现建筑物目标的各区域,轮廓清晰;距离像可有效地区分不同距离的区域,距离分辨能力较好。

关键词:激光雷达;激光成像雷达;多狭缝条纹管;闪光式焦平面

中图分类号:TN29 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20162413.0001

Multiple-slit streak tube imaging lidar

ZHOU Xin^{1*}, JIANG Peng², SUN Jian-feng¹, WANG Qi¹

- (1. National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Institute of Opto-electronic Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
 2. Beijing Institute of Electro-Mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China)
- * Corresponding author, E-mail: hit_sxz@163.com

Abstract: In order to effectively improve the imaging property of multiple-slit streak tube, an experimental platform for Multiple-Slit Streak Tube Laser Imaging Lidar (MS-STIL) was established with a domestically-made optical taper and streak tube. The fiber arrangements of the optical taper were converted from 128×32 at fore-end to 8×512 at back-end, thus changing the planar image to 8 stripes image and enabling the detector to achieve effective detection of field of view. The laser wavelength of this system is 532 nm, with an imaging pixel element of 128×32 and a spatial resolution lower than 0.3 mrad, and all-weather operations can be achieved. On the platform, imaging experiments for out-field building targets were performed, from which the non-scanning image of 1.7 km target and the scanning image of 720 m target were obtained respectively. The imaging results indicated that the proposed MS-STIL can capture the laser images of long-distance targets, as the intensity image can well display the areas where the building target is located, with clear outline; the distance image can effectively divide the areas with different distances, with relatively high distance resolution.

Key words: laser radar; laser maging lidar; multiple-slit streak tube; flash focal-plane

收稿日期:2016-05-28;修订日期:2016-06-11.

1 引言

激光成像雷达自诞生之日起就备受国际军事强国的高度关注。20 世纪国际上激光雷达主要为单元扫描体制,但受到成像帧频及图像畸变等因素的限制,这种体制没能得到广泛应用^[1-2]。进入 21 世纪后,国际上闪光式焦平面成像体制成为发展重点。该体制主要包括面阵 APD 及条纹管两种技术,采用一次曝光成像,成像帧频高且图像清晰,在导航、对地观测等方面具有应用潜力^[3-5]。多狭缝条纹管激光成像雷达最早由美国海军提出,其成像指标为:像元数 64×64 ,成像距离 $< 200 \text{ m}$ 。目前,该雷达已完成了机载对地成像实验^[6-7],并获得了隐蔽在树下小汽车的多狭缝条纹像及重构后的强度像和距离像。

我国紧跟国际前沿,在美国提出多狭缝条纹管方案后,也随即开展了该成像技术的研究^[8-9]。其中,哈尔滨工业大学自 2005 年开始研制多狭缝条纹管激光成像雷达(Multi-slit Streak Tube Imaging Lidar, MS-STIL),其像元数为 48×48 ,作用距离为 1 km ^[10]。为进一步提升多狭缝条纹管的成像性能,本文在该激光成像雷达系统的基础上,改进了光纤变换器和条纹管探测器,使像元数达到 128×32 ,作用距离为 1.7 km ,改进后的 MS-STIL 系统能够获取轮廓清晰的图像,具备良好的实际应用价值。

2 多狭缝条纹管激光成像雷达设计

2.1 多狭缝条纹管激光成像雷达系统组成

多狭缝条纹管激光成像雷达是在单狭缝条纹管激光成像雷达的基础上发展而来。两种激光成像雷达的核心均是条纹管。以单狭缝条纹管为核心的激光成像雷达需要进行推扫才可得到面阵图像,而以多狭缝条纹管为核心的激光成像雷达单帧便可得到面阵图像,由此提高了成像速度。

图 1 是多狭缝条纹管激光成像雷达装置的原理图。该装置为直接探测型,主要包括光学发射系统、光学接收系统、图像获取与处理系统以及计算机控制系统等。激光器发出脉冲激光,经过光学发射系统准直、扩束以及整形为系统所需的光斑,随后照射到目标上。其回波信号由接收镜头

接收,聚焦到光锥(光纤变换器)上,光锥将接收的平面光整形为多条线状光斑,其后端面与条纹管前端面耦合。条纹管将探测到的光信息经过‘光-电-光’过程使光信息显示到后端的微通道板(Micro Channel Plate, MCP)上,并经 CCD 耦合后进行目标重构,得到目标的强度像与距离像。同时,通过计算机控制也可进行距离的选通调节及系统的转动调节等。

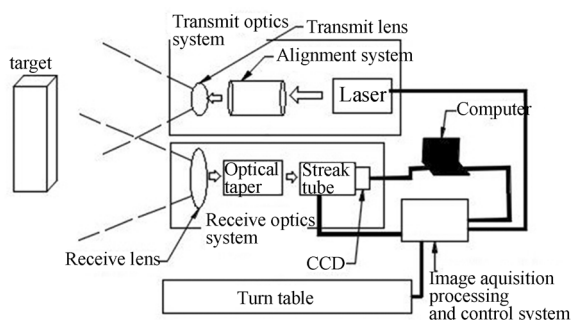


图 1 多狭缝条纹管激光成像雷达原理

Fig. 1 Basic principle of Multi-slit Streak Tube Imaging Lidar (MS-STIL)

课题组研制的 MS-STIL 装置见图 2,装置集成到黑色箱子中。激光发射波长为 532 nm ,并带有 532 nm 窄带滤波片,可在白昼与夜晚成像,所得到的图像像元数为 128×32 ,空间分辨率 $< 0.3 \text{ mrad}$,通过转动转台可以进行大面积扫描成像。

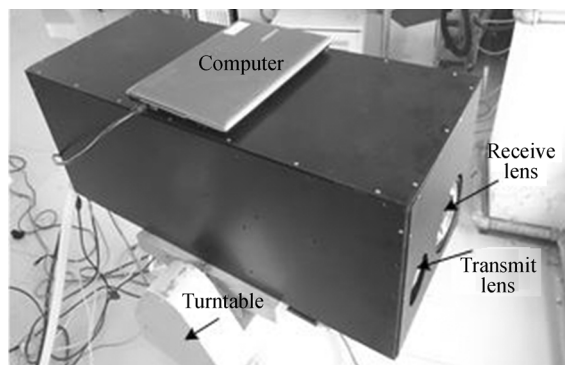


图 2 多狭缝条纹管激光成像雷达装置

Fig. 2 Setup of MS-STIL

2.2 光锥与多狭缝条纹管的工作原理

多狭缝条纹管与单狭缝条纹管的工作原理相似,两者的不同之处在于前者的光电阴极接收的是多狭缝图像。针对多狭缝图像,器件后边的偏转电压要对所有的条纹像同时进行偏转。

2.2.1 光锥结构

多狭缝条纹管得到的条纹图像是由光锥将平面图像整形得到的。图 3 与图 4 为课题组的激光雷达所采用的光锥结构。图 3 为光锥结构图,此光锥内部含有 128×32 根光纤(内径 30 μm)。在光锥前端,每 32 根光纤排成一列,共排成 128 列;在光锥后端,这 128 列光纤进行重新排布,变为 8 行,每行 16×32 根光纤。图 4 为光锥前后端面光纤的排布方式。前端的 128 列光纤在光锥内部进行交叉排布,使得前 16 列光纤按顺序排列为光锥后端的第 1 行,依次每 16 列排成一行,构成 8 行光纤。这种方式便可以将平面像转变为 8 行线状电子像。

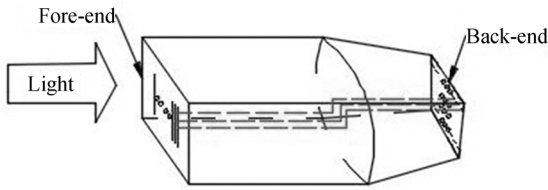


图 3 光锥结构

Fig. 3 Structure of optical taper

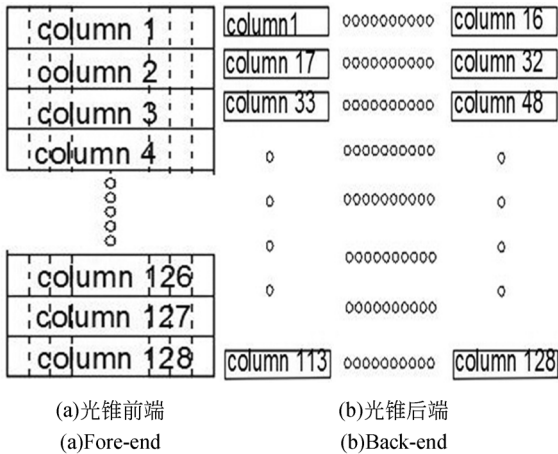


图 4 光锥内部的光纤排布方式

Fig. 4 Arrangement of optical fibers in optical taper

2.2.2 多狭缝条纹管的工作原理

图 5 为多狭缝条纹管的结构图。图 5 中,多狭缝并不是结构装置,而是光锥入射到条纹管上的多个线状电子光斑。当经光锥变换得到的多条线状脉冲光斑照射到条纹管的光阴极上时,将发射光电子,其瞬态发射密度正比于该时刻的光脉冲强度,因此光阴极发出的电子脉冲在时空结构上是入射光脉冲的复制品。电子脉冲经静电

聚焦系统聚焦后,8 行线状电子条纹进入偏转系统中,偏转系统上加有随时间线性变化的斜坡高压。在同一时刻 8 条条纹受到的偏转电压相同,而不同时刻进入偏转系统的电子受到不同偏转电压的作用,按照脉冲到达的时间顺序,电子偏转到荧光屏不同的位置,最后通过 MCP 放大。MCP 与 CCD 耦合,使得条纹像被 CCD 捕获。

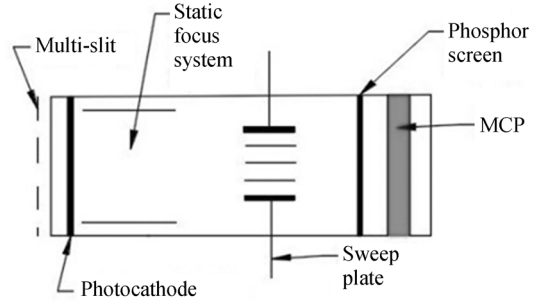


图 5 多狭缝条纹管的结构图

Fig. 5 Scheme of multiple-slit streak tube

2.2.3 多狭缝条纹重构原理

根据多狭缝条纹管的成像原理,条纹管得到的是多条条纹像,其代表的是激光辐射区域的空间位置信息,需要对条纹像进行重构,才能获取目标的四维像信息。图 6 为实验中 CCD 获得的一帧条纹像,图像中共有 8 行条纹,其它区域为噪声,可用算法减弱。

在目标重构过程中,需要对条纹图像进行划分,每一行等距地分为 16 段,每一列等距地划分为 8 段,这样便将图像均分为 128 份,每一份中含有一个条纹像,这些条纹像所在的位置就是光锥后端进入条纹管所在的位置。针对每份条纹图像,采用单狭缝条纹管激光雷达的峰值探测算法对 32 个回波点进行重构^[11]。该算法认为回波信号的最强点为目标的目标强度信息,该点所对应的位置为距离信息。最后将重构的图像按照光锥的排布位置进行拼接,便可重构出目标的四维像(一维强度像+三维距离像)。

3 成像实验

利用课题组研制的 MS-STIL 对 1.7 km 目标进行无扫描成像,得到目标被激光照射区域的强度像与距离像;同时对 720 m 的目标进行扫描

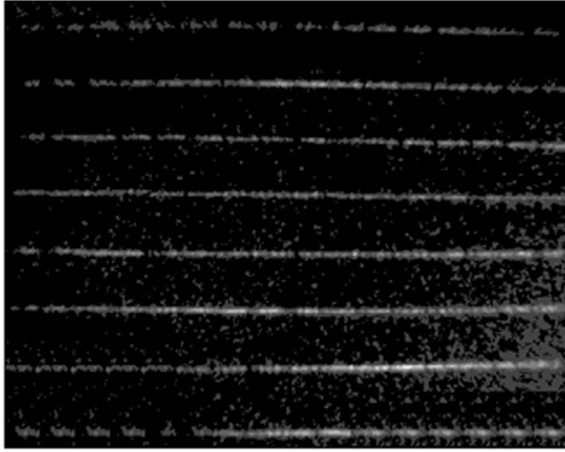


图 6 真实条纹像

Fig. 6 Real streak tube image

成像,得到目标的完整强度像与距离像。

3.1 1.7 km 目标成像结果

对 1.7 km 目标进行单帧成像,并进行条纹像重构,结果如图 7 所示。图 7(a)中方框区域为激光辐射区域,图 7(b)与图 7(c)为重构得到的目标强度像与距离像。

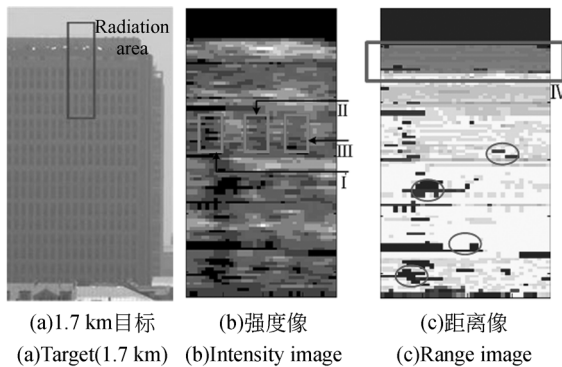


图 7 1.7 km 目标成像结果

Fig. 7 Imaging results of target at 1.7 km

整体上,激光图像能够较好地展现目标的轮廓与细节。从强度像与距离像上可以看到,目标能够很好地与天空的大气后向散射分开,利用算法可以将天空区域处理得很干净。强度像的 I、II、III 区域为窗户,可以看到其轮廓,由于光锥像元数的限制,轮廓比较模糊。距离像上,不同颜色代表的距离不同,用测距机测得楼顶区域 IV 与楼体的距离差为 19 m,在距离像上可清晰地辨别出两个区域。

在距离像上,楼体区域类似用椭圆标出的蓝色奇点是由于光锥中一些光纤损坏,以致不传输回波激光造成的。此外,目标的一些细节分辨不出,这在后期的目标重构过程中可以通过改进算法来解决。

3.2 720 m 目标成像结果

利用转台对 720 m 目标进行推扫实验,重构出目标的完整轮廓。图 8(a)中方框区域为 720 m 目标的激光辐射区域,图 8(b)与图 8(c)为重构得到的强度像和距离像。

整体上,激光图像能够较好地展现目标的轮廓与细节。首先,整个目标轮廓可以在强度像与距离像上清晰地观察到;其次,楼顶的 I、II 拱形孔以及 III 拱形窗均能在强度像上清晰地呈现;最后,由于楼顶 V 与楼体的距离不同,在距离像上表现为不同的颜色,距离像能够清晰地分辨出目标各个不同距离的部位。

不过在两幅图中均含有图 8(a)的楼顶 IV 区域的重构图像。其原因是,IV 区域相对雷达装置的角度倾斜较大,使得激光回波难以被接收镜头接收。

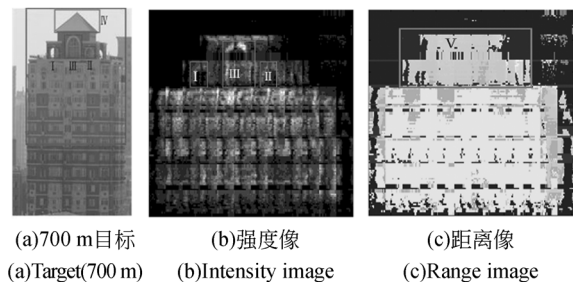


图 8 700 m 目标的成像结果

Fig. 8 Imaging results of target at 700 m

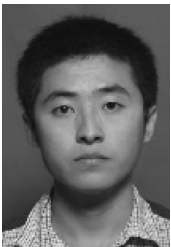
4 结 论

本文对多狭缝条纹管激光成像雷达原理进行了较为深入地研究,并改进了光纤变换器和条纹管探测器,研制了一种改进的 MS-STIL。采用该系统得到了 1.7 km 目标的单帧四维像以及 700 m 目标的推扫四维像。从成像结果来看,目标的轮廓以及一些细节能够清晰地呈现,表明此装置可实现远距离目标探测。下一步将对目标重构算法进行研究,以得到更为清晰的目标四维像。

参考文献:

- [1] VERLY J G, DELANOY R L. Model-based automatic target recognition (ATR) system for forward-looking groundbased and airborne imaging laser radar (LADAR) [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1996, 84(2):126-163.
- [2] GREER D R, FUNG I, SHAPIRO J H. Maximum-likelihood multiresolution laser radar range imaging [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(1):36-46.
- [3] JACK M, CHAPMAN G, EDWARDS J, *et al.*. Advances in LADAR components and subsystems at Raytheon[J]. *SPIE*, 2012, 8353:83532F-1-17.
- [4] VERGHESE S, MCLINTOSH K A, LIAU Z L, *et al.*. Arrays of 128×32 InP-based Geiger-mode avalanche photodiodes [J]. *SPIE*, 2009, 7320:73200M-1-8.
- [5] Gleckler A D. Multiple-Slit Streak Tube Imaging Lidar (MS-STIL) applications [J]. *SPIE Aero-sense*, 2000, 4035:266-278.
- [6] GELBART A, WEBER C, BYBEE-DRISCOLL S, *et al.*. FLASH lidar data collections in terrestrial and ocean environment[J]. *SPIE*, 2003, 5086:27-38.
- [7] GLECKLER A D, GELBART A, BOWDEN J M. Multispectral and hyperspectral 3D imaging lidar based upon the multiple slit streak tube imaging lidar[J]. *SPIE*, 2001, 4377:328-335.
- [8] 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.
ZHAO B SH, CHEN M. The application of ms-streak tube in three-dimensional lidar system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(12):1425-1427. (in Chinese)
- [9] LIU J, WANG Q, LI S, *et al.*. Research on a flash imaging lidar based on a multiple-streak tube[J]. *Laser Physics*, 2009, 19(1):115-120.
- [10] WANG Q, LIU J B, LI S N. Analysis of detectable range of multiple-slit streak tube imaging lidar [J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2009, 30(3):296-303.
- [11] 孙剑峰, 魏靖松, 刘金波, 等. 条纹管激光成像雷达目标重构算法[J]. *中国激光*, 2010, 37(2):510-513.
SUN J F, WEI J S, LIU J B, *et al.*. Target reconstruction algorithm for streak tube imaging lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(2):510-513. (in Chinese)

作者简介:



周 鑫(1990—),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,2014年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事激光图像处理、目标特性分析等方面的研究。E-mail: hit_sxzx@163.com

导师简介:



孙剑峰(1978—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授,博士生导师,2007年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事激光图像处理及目标识别方面的研究。E-mail:sjf@hit.edu.cn