

特邀专稿

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2020.01.001

## 水下目标高分辨成像激光雷达研究\*

韩文杰<sup>1</sup>, 董光焰<sup>1</sup>, 彭凤超<sup>1</sup>, 杜丽梅<sup>1</sup>, 黄尚兵<sup>1</sup>, 迟 晨<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第二十七研究所, 郑州 450047;

2. 中国电子科技集团公司第五十五研究所, 南京 210016)

**摘 要:** 介绍了基于条纹管探测体制的激光雷达的发展应用现状、工作原理、技术优势, 针对水下目标与场景探测, 分析论证了激光雷达系统的技术参数, 在此基础上设计研制了一套条纹管激光雷达样机, 并进行相关试验测试, 获取了目标多维图像。通过分析评估其探测能力, 提出下一步优化改进方向, 最后对该体制激光雷达的应用进行了展望。

**关键词:** 激光雷达; 条纹管探测器; 水下三维成像; 高分辨率

**中图分类号:** TN249   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1005-488X(2020)01-0001-05

## Research of High Resolution Imaging LIDAR for Target under Water

HAN Wenjie<sup>1</sup>, DONG Guangyan<sup>1</sup>, PENG Fengchao<sup>1</sup>, DU Limei<sup>1</sup>, HUANG Shangbing<sup>1</sup>,  
CHI Chen<sup>2</sup>

(1. *The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, CHN*; 2. *The 55th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210016, CHN*)

**Abstract:** The developing status, operating principle and technological superiority of streak tube LIDAR were introduced in the first place. Aiming at detection of target and surroundings under water, the parameters of LIDAR system were calculated, based on which a streak tube LIDAR prototype was developed. A number of multiple dimension images were acquired by means of test and experiment, and the optimizing method was presented for later work after the detector performance of prototype was evaluated. At last, the LIDAR application expectation was discussed.

**Key words:** LIDAR; streak tube detector; 3D imaging under water; high resolution ratio

收稿日期: 2019-10-21

\* 基金项目: 某装备预研支持项目

作者简介: 韩文杰(1981—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为新体制激光雷达、全固态激光技术; (E-mail: wjhan1018@163.com)

董光焰(1978—), 男, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为新体制激光雷达、光电探测系统; (E-mail: optgyd@163.com)

彭凤超(1980—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为激光测距、成像激光雷达。(E-mail: pfcmail@163.com)

## 概 述

近年来海、陆、空、天各类激光主动成像装备快速发展,迫切要求激光雷达通过采用非机械扫描体制来实现系统性能的大幅提升,满足小/微型化、低功耗、高效率、高精度的平台应用需求。

条纹管成像激光雷达(Streak tube imaging Lidar, STIL)是一种非机械扫描体制激光雷达系统,其设计思想在1989年被F.K. Knight等首次论证<sup>[1]</sup>,并研制出16×16像素的雷达样机。美国Arete公司从1995年开始条纹管激光雷达的研究,90年代末美国空军研究实验室与Arete公司合作,将这项技术应用于目标自动识别巡航导弹前下视末制导,并完成系统组装,视场角47.6°、距离分辨力15 cm、作用距离200 m、重复频率10 Hz;并于1998年对一套STIL系统进行了直升机挂飞试验,采用100 mJ、532 nm、10 ns激光器作为光源,扩束12.6°,探测距离500 m,距离分辨力10 cm。2001年Arete公司研制了基于多狭缝条纹管技术的64×64像素的激光雷达原理样机<sup>[2]</sup>,意图发展战术成像激光雷达系统,经过空基对树下隐藏目标和水下水雷目标的成像试验,展示了很好的战术应用潜力,在100 m高度对地面成像时空间分辨率为14 cm×14 cm,距离分辨率0.5 m,帧频30 Hz。2002年美国海军研究所的光电识别研究项(EOID)中,将条纹管激光成像系统加装在水下拖体上,对海底的水雷状目标进行成像实验,目标与海底地貌成像细节清晰可辨,表明该成像系统具有对水下目标三维成像的能力<sup>[2-4]</sup>。美海军司令部与诺·格公司合作开展机载激光水雷探测系统(ALMDS)项目<sup>[3-4]</sup>,其核心部件是条纹管激光雷达,2007年初完成首套ALMDS交付,装备于MH-60S直升机上,使用蓝绿激光,对近水面停泊与移动的水雷进行探测、定位和分类,探测深度超过40英尺,能在短时间内探测大片海域,2012年完成机载ALMDS评估测试,截止到2016年已经完成9个小批量生产。国内哈尔滨工业大学、北京理工大学、中科院西安光机所、中国电科55所等单位对条纹管探测技术进行了相关研究<sup>[5-8]</sup>,涉及理论计算与仿真、样机试验、关键器件技术等方面,哈工大研制的原理样机实现了对地面大楼和水下小目标的成像,55所的条纹管探测器已实现国产化。

条纹管探测器采用高速电子束扫描区分不同距离的目标,具有极高的距离分辨率(cm级),其响应波段为400~800 nm,与水下蓝绿激光传输窗口

相吻合,可采用成熟的532 nm脉冲激光作为光源,在水下目标探测领域具有独特优势。条纹管成像激光雷达回避了焦平面阵列(FPA)探测技术面临的大面阵ROIC集成工艺难点,能获取目标高分辨率三维图像和强度图像,克服了步进机械扫描的一些性能局限,不需通过惯性测量装置来校正由于探测平台运动造成的图像失真,避免了复杂的修正算法与硬件支持,提高了系统成像效率<sup>[9-11]</sup>。该系统通过特殊的视场分割重组光学接收装置,用一个激光脉冲便可获取视场内全幅图像的三维信息,对于需要高速实时成像的应用领域,该体制激光雷达的成像速率及效果具有显著优势。文章基于条纹管探测原理,构建了激光雷达原理样机,通过试验验证了系统性能,并提出下一研制阶段的优化方向。

## 1 工作原理

条纹管激光雷达系统在功能上主要包含以下几部分:激光发射单元、光学单元、探测组件、控制单元、信息处理单元。其中,激光发射单元包含倍频脉冲激光器、激光驱动、激光温控等,根据系统控制产生532 nm激光脉冲;光学单元包含发射整形光学、接收光学、映射光学、扫描光学等,将激光器发射的激光整形为条形光束并收集目标返回激光信号,对视场进行分割重组(该功能可根据系统设计取舍),完成一维扫描等;探测组件包含条纹管及其多路驱动电路、高速CCD等,完成光信号的光电转换、聚焦、扫描、倍增、图像采集功能;控制单元是系统控制中枢,对其他单元发送控制命令,使其在精确的时序逻辑下完成各自功能,并收集各单元的状态信息。信息处理单元对原图像进行存储、处理,完成目标图像的反演与显示。

激光雷达工作原理如图1所示,脉冲激光器发出一个纵向条形脉冲光束照射目标区域,目标反射的光信号被接收光学系统收集,由映射光学系统传导至条纹管探测器光电阴极,经探测器进行信号转换、偏转与增强,然后在荧光屏上得到初始图像并被CCD采集后送至信息处理机进行解调、去噪、图像反演、存储显示,最后得到目标的高精度三维图像。每发射一个激光脉冲,探测器可获取一幅二维(线阵-距离)目标图像,这样通过平台的前向运动或一维光学扫描全部场景,便可得到一系列空间连续的线阵图像,然后经过解算处理可重构完整的场景三维图像。由于该成像机制对光强敏感,同时能够

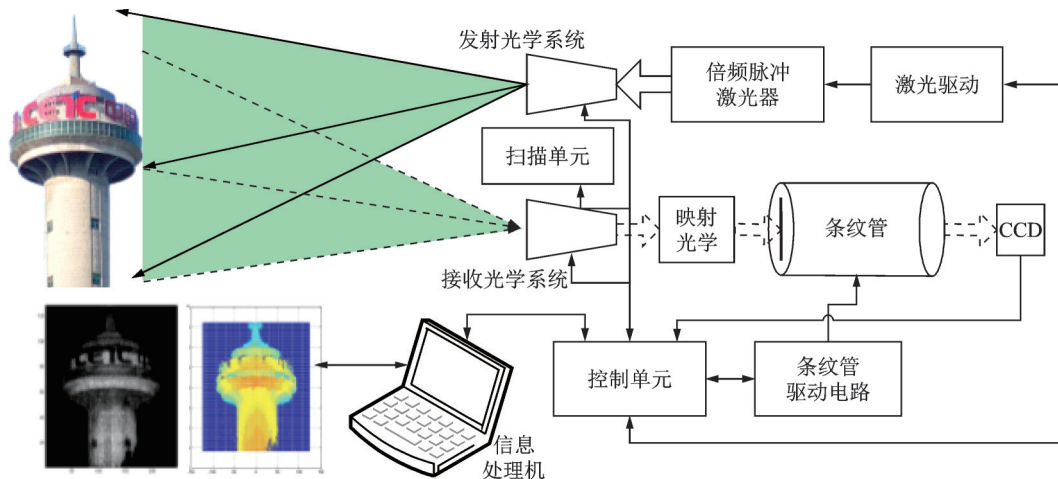


图1 条纹管激光雷达工作原理图

Fig.1 Operating principle of streak tube LIDAR

获取场景目标的灰度信息,因此可同时输出场景目标的空间三维图像和灰度图像。

条纹管探测器是系统核心器件,其构造原理如图2所示,接收光学系统收集目标反射的光信号,将其成像在条纹管光电阴极上,阴极产生光电子,光电子经加速通过狭缝门电极,形成一个对应条形视场的条形电子束,电子束经加速电极加速、静电聚焦极聚焦后,进入偏转系统(偏转板)。由于偏转系统上加有随时间线性变化的斜坡电压,不同时刻进入偏转系统的光电子受到不同偏转电压的作用,光电子束经像增强器(MCP)增强后到达条纹管荧光屏时,将沿垂直于狭缝的方向展开,在荧光屏上形成清晰可见的条纹图像(狭缝像),即条纹管在此方向上分成了多个时间分辨的通道,不同时间到来的回波信号在条纹管的荧光屏上显示的条纹位置不同,利用屏上条纹的相对位置就可以分辨出目标的距离信息。由于条纹管采用高压偏转扫描,因此可

以区分时间间隔极短的电子束条纹,即分辨极小的距离间隔,实际检测其时间分辨能力可达ps级。

## 2 系统设计

### 2.1 样机组件

拟设计一个激光雷达原理样机,实现对水下 $\geq 15$  m远、 $0.2\text{ mm} \times 0.3\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$ 大小的角钢金属架目标的探测与成像。样机结构组成如图3,所有功能单元集成在一个 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 230\text{ mm}$ 的方形结构舱体内,采用LD泵浦的固体脉冲激光器作为基频光源,通过倍频技术产生532 nm绿激光;条纹管探测组件为中国电科55所研制,该组件将狭缝、条纹管、高压电路和高速扫描驱动电路,传像光锥、CCD图像模块等集成为一体,充分压缩了系统体积;激光驱动电路与系统控制电路的板卡、模块固定于舱体底板上;采用SIGMA-F5-6.3HSM可变焦镜头作为接收光学单元,口径70 mm;采用

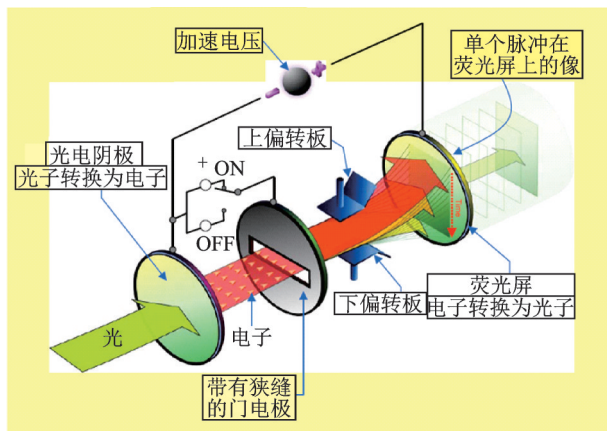


图2 条纹管探测器工作原理图

Fig.2 Operating principle of streak tube detector

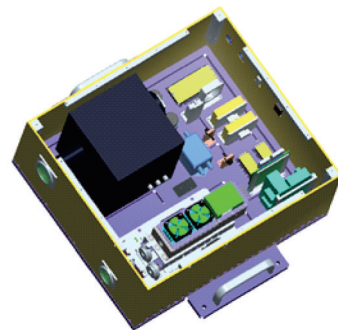


图3 条纹管激光雷达样机

Fig.3 Prototype of streak tube LIDAR

柱面镜对原始激光束进行整形,使其形成探测所需的条形光束;结构舱整体固定在一个高精度一维转台上,实现方位方向的扫描。

## 2.2 探测能力分析

根据激光雷达探测方程

$$R = \left( \frac{4P_t \tau_t \tau_r A_r \eta \sigma \rho \tau}{\pi^2 P_r} \right)^{1/2} \quad (1)$$

及水体透过率公式

$$\tau = \exp(-2\alpha R) \quad (2)$$

来计算分析激光雷达样机的探测能力。

以上公式中符号含义、取值见下表。

经测定,系统的探测灵敏度为  $5 \times 10^{-7} \text{ W}$ , 水体衰减系数为  $0.26 \text{ m}^{-1}$ 。金属架目标典型反射率为 0.2, 激光原始束散角为  $5 \text{ mrad}$ , 扩束整形后为

表 1 激光雷达设计参数

Tab.1 Designing parameters of LIDAR

符号	含义	单位	数值
$R$	作用距离	m	18
$P_t$	激光发射峰值功率	mW	2
$\tau_t$	发射光学效率		0.7
$\tau_r$	接收光学效率		0.5
$A_r$	接收光学口径	m	0.07
$\eta$	俯仰方向目标对探测器张角 与激光束散角比		0.5
$\sigma$	方位方向收发视场比		0.02
$\rho$	目标反射率		0.2
$\tau$	水体双程透过率	拟合结果	
$\pi$	圆周率		3.14
$P_r$	探测灵敏度	W	$5 \times 10^{-7}$
$e$	自然常数		2.72
$\alpha$	水体衰减系数	$\text{m}^{-1}$	0.26

$5 \text{ mrad} \times 5^\circ$ , 调节接收镜头视场与激光束散角相匹配, 水体的双程透过率通过以上两式拟合计算得到, 收发光学效率根据工程实践数据进行设定, 发射激光脉冲宽度  $8 \text{ ns}$ , 峰值功率为  $2 \text{ mW}$ , 其他参数见上表。在以上设计条件下, 得到该激光雷达样机的水下探测距离为  $18 \text{ m}$ 。

条纹管激光雷达的距离分辨率由下式给出<sup>[12]</sup>,

$$\Delta R = \frac{1.5 \left( \frac{(n-p1)s}{e} - V_0 \right)}{K} \times 10^8 \quad (3)$$

其中,  $K$  为条纹管偏转系统的电压斜率,  $p1$  为基准像素位置,  $n$  为当前条纹像素位置,  $s$  为像素尺寸,  $e$  为偏转灵敏度,  $V_0$  为基准线对应偏转电压, 取  $K = 2.5 \times 10^7 \text{ kV/s}$ ,  $n-p1 \approx 260$  (试验最大观测值),  $s = 4 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $V_0 = 0$ ,  $e = 60 \text{ mm/kV}$ , 则距离分辨率约为  $0.1 \text{ m}$ 。

系统空间分辨率由接收光学视场、条纹管阴极动态分辨率 ( $15 \text{ lp/mm}$ )、狭缝长度、狭缝方位视场、转台步进精度 ( $0.01^\circ$ ) 决定, 接收视场为  $5^\circ$ 、狭缝为  $10 \text{ mm} \times 30 \text{ } \mu\text{m}$  时, 系统空间分辨率为  $0.29 \text{ mrad} \times 0.44 \text{ mrad}$ 。

## 3 试验研究

### 3.1 地面目标探测试验

在室内目标成像测试中, 接收镜头采用  $400 \text{ mm}$  焦距, 小视场提高了条纹管阴极狭缝的空间分辨率, 对距离  $23 \text{ m}$  处直径  $1.2 \text{ m}$  圆形扇叶目标成像观测, 能够达到优于  $5 \text{ cm}$  的空间分辨率, 如图 4 所

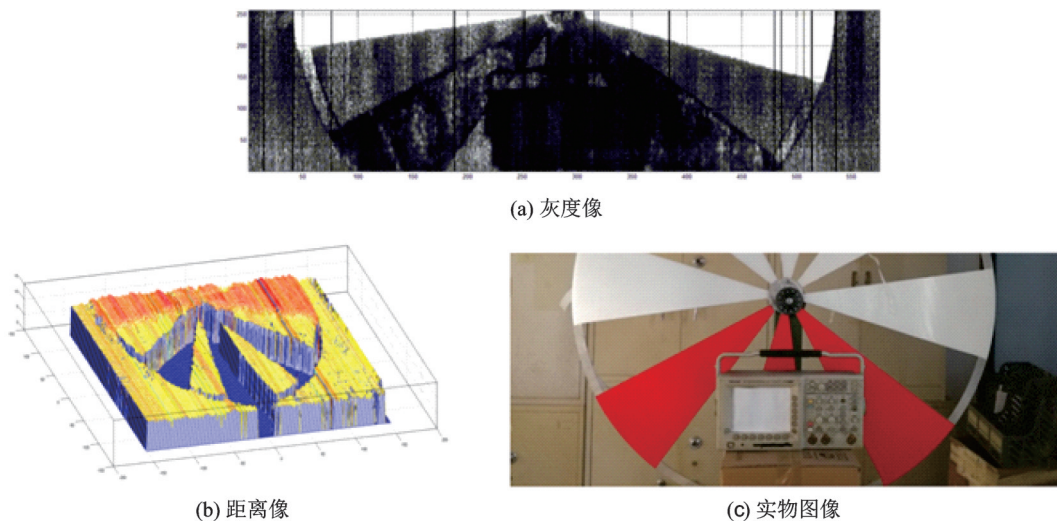


图 4 圆形扇叶目标图像

Fig.4 Images of circular fan-shaped target

示,可清晰区分扇叶目标与其前边的示波器轮廓,由于激光器开关为模拟高压控制,与触发信号间存在间歇性较大的相对时间抖动,再叠加激光脉宽的影响,造成系统距离精度较低,后续研究中需要优化激光开关与控制电路的匹配特性,压缩脉宽,提高距离精度。

通过对室外大目标成像进行测试,研究了条纹管激光雷达样机的探测能力、系统灵敏度、场景目标的三维像合成等问题,在 $10^\circ$ 接收视场时最远可探测到1.5 km处大楼目标的条纹信号。下图是对270 m远处标校塔的探测结果,在距离以及灰度图像中塔的轮廓与字体清晰可辨,通过多维图像融合

将有助于进一步提高系统对目标的细节识别能力。

### 3.2 水下目标探测试验

在一个50 m长水槽中注入市供自来水,水槽一端为透光玻璃,样机置于玻璃外向水槽内收发激光,金属架目标置于水中,进行水下成像测试。按照2.2节设计参数,调节镜头视场为 $5^\circ$ ,此时狭缝对应的方位方向视场为 $0.09\text{ mrad}$ ,与激光束散角比值为0.02,激光脉冲能量为20 mJ,自来水透过率为 $0.26\text{ m}^{-1}$ ,实际测得目标最远距离约为17.5 m,与2.2节的计算结果相吻合,作用距离大于ALMDS系统所公布的测试水深,目标图像见下图。

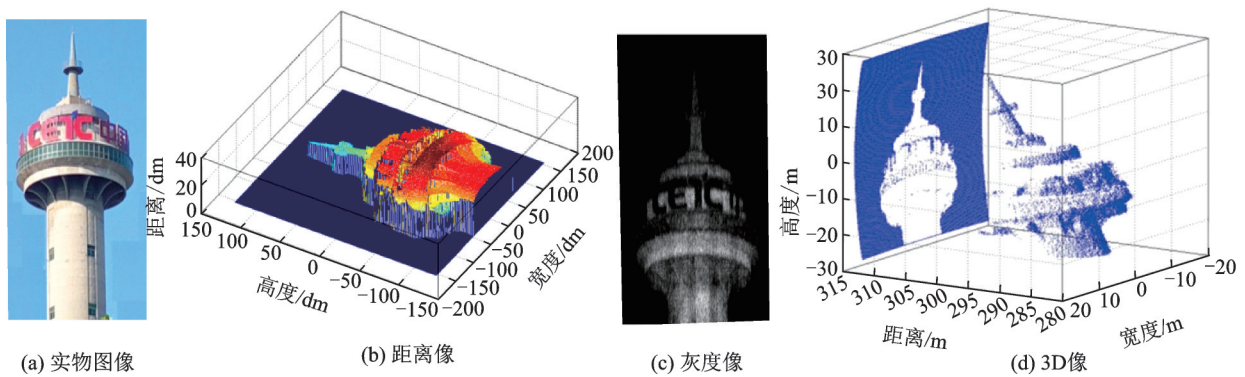


图5 标校塔目标图像

Fig.5 Images of calibrating tower

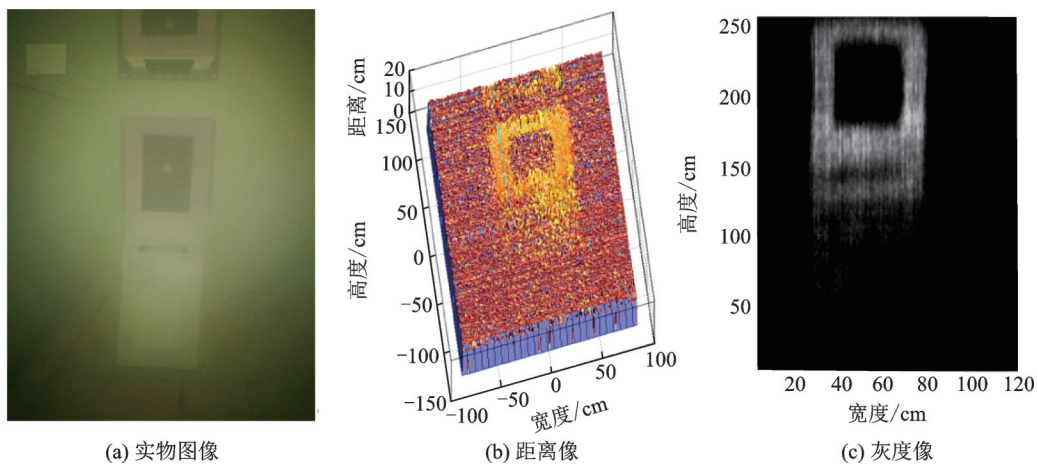


图6 水下金属架目标图像

Fig.6 Images of metal shelf target under water

水体的衰减系数(浑浊度)对激光在水中的透过率影响很大,水越浑浊激光衰减越严重,探测距离大幅减小,因而条纹管激光雷达的水下探测能力与水质密切相关,评价其探测能力要以水体衰减系数作为参考。更换浑浊水进行测试,水体衰减系数为 $1.6\text{ m}^{-1}$ ,实际最大探测距离为3.6 m,根据(1)、(2)式计算结果为3.9 m,一致性较好。

因此通过对比分析2.2节计算结果与试验情况,可以明确样机性能优化改进的具体技术措施。

根据(2)式设计参数,考虑到整机结构尺寸、通光口径、空间分辨率、激光与光学的设计难度,可适当调整狭缝宽度,压缩激光输出发散角,增大方位收发视场比,提高激光峰值功率来增加探测距离,且目前采用的条纹管探测器为国内2代产品,其阴极灵敏度与国外已装备的3代产品具有数倍的差距,国内新一代探测器关键技术正在快速突破,其应用将使系统灵敏度和探测距离大幅提升。对于距离分辨率,通过提高系统时序控制精度、(下转第18页)