

采用多狭缝条纹管实现激光三维成像

赵宝升 陈敏

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘要 为了实现高清晰, 高准确的近距离和中距离探测, 介绍了一种采用多狭缝条纹管实现激光三维成像的方法. 多狭缝条纹管作为成像系统的核心器件, 对成像准确起主要影响. 通过对成像原理的分析以及条纹管参数之间的关系推导, 对多狭缝条纹管的技术指标进行了计算和设计, 得出了电子光学系统的主要设计指标.

关键词 激光成像雷达; 条纹管; 时间分辨率; 空间分辨率

中图分类号 O434.1; TN105.2 **文献标识码** A

0 引言

1989年, 美国的 F. K. Knight 等人首先演示了用单狭缝条纹管扫描方式实现 16×16 像素的激光雷达系统^[1]. 近十几年, 国外相关实验室和研究机构都在努力进行这方面机理和关键器件的研究. 美国空军实验室和美国海洋管理局 (NOAA) 于 2000 年提出了利用条纹相机实现脉冲式非扫描激光三维成像雷达方案 (MSTL) 并进行了大量的实验研究, 其特点就是成像清晰度高、距离准确高、成像帧频高. 正是由于这些成像特点, 激光三维成像雷达技术无论是在军事还是民用方面都有着很高的应用价值, 特别是能够进行高帧频三维成像的非扫描式激光成像雷达, 在军事和航天领域有着非常的大需求^[2]. 目前, 美国相关研究机构能实现 64×64 像素的非扫描激光成像雷达系统, 成像的距离准确小于 2.5%, 图像处理速度可达到每秒 100 帧^[1]. 针对国内发展的空白, 并借鉴国际上先进的激光雷达应用发展趋势, 下面对激光成像雷达系统的原理进行了讨论, 对多狭缝条纹管的技术指标进行了计算和设计.

1 单狭缝扫描变像管的工作原理

单狭缝扫描变像管由光电阴极 (PC)、加速系统 (M)、聚焦系统 (F)、偏转系统 (D) 和荧光屏 (PS) 等部分组成. 物镜将瞬态光源 A 的像成在狭缝上, 狭缝取出 A 的一维空间信息通过中继透镜成像在变像管的光电阴极上, 如图 1. 当光电阴极上的狭缝部分被 A 所发出的光脉冲照明时, 这一部分将发射光电子, 并且光电子的瞬态发射密度正比于该时刻的光脉冲强度, 所产生的光电子脉冲的持续时间就是入射光脉冲的持续时间, 因此光电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. 只要设

法测出电子脉冲的时空结构, 就可以得到入射光脉冲的时空结构. 电子脉冲从阴极上发出, 经静电聚焦系统聚焦后, 进入偏转系统. 偏转系统上加有随时间线性变化的斜坡电压, 由于不同时刻进入偏转系统的电子受到不同偏转电压的作用, 电子束到达荧光屏时, 将沿垂直于狭缝的方向展开, 这一方向对应于时间轴, 因此可以得到沿狭缝每一点展开的时间信息. 为了保证电子脉冲和斜坡电压的同步, 在光路中引入分束器, 该分束器将一部分光送入物镜, 另一部分光送入 PIN 管, 由于 PIN 输出的电脉冲经可变延时器适当延时后触发斜坡电压发生器. 电子经前面的系统加速后轰击荧光屏, 转换为可见光. 荧光屏输出的狭缝扫描图像, 一般采用接触照相机或 CCD 实时读出系统记录. 因此记录的是一维空间随一维时间的变化信息.

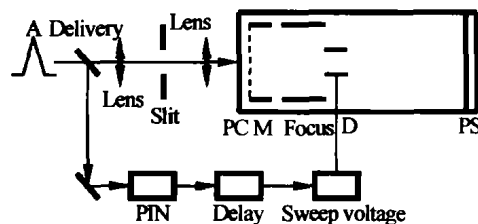


图 1 扫描变像管的工作原理
Fig. 1 Illustration of streak tube operation

2 多狭缝条纹相机激光成像雷达

图 2 为激光雷达的工作原理示意图, 其核心思想是利用条纹管对不同时间到来的光电子进行偏

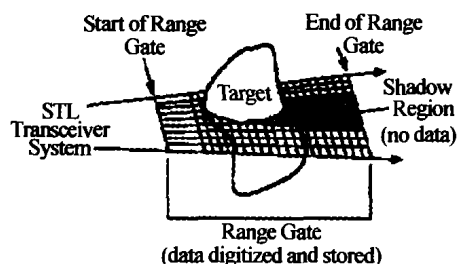


图 2 条纹相机激光雷达成像原理图
Fig. 2 A laser fan-beam illuminates a target field

转,以分辨它们之间的时间差异,实现三维距离信息的获取.最后由 CCD 相机作为焦平面探测器,将获取的数据经计算机处理,得到 4D 图像^[2].

目前美国实用化 MSTL 激光雷达是应用在大气环境中的,集成后的体积为 30 cm 孔径 × 50 cm,其中大部分体积为二极管泵浦 YAG 激光器和倍频装置,如果应用在太空,其体积应该还可以压缩,更为小型化,这主要是由于以下两方面的原因^[1]:

1)空间环境对激光的吸收很少,激光器不需要特别高的功率.2)倍频 YAG 激光主要是考虑海洋的穿透能力,而空间应用中没有这方面的限制,倍频器件可以省略.

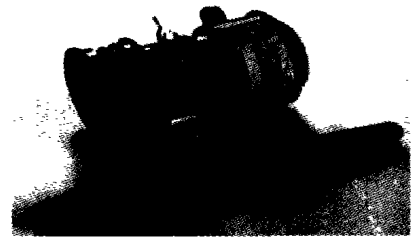
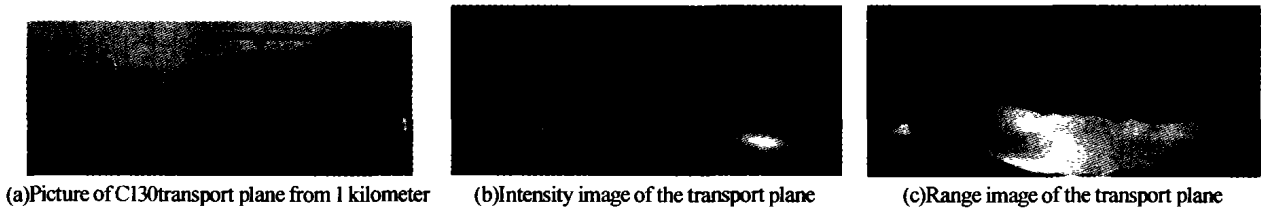


图 3 条纹管实物照片
Fig. 3 The picture of MS-streak tube

图 4 是 MSTL 对 1 km 目标的成像实验结果,从中可以看出,MSTL 即能够给出高分辨率的强度像,还能给出高准确的三维几何像,同时获取 4D 信息(3D + 强度).这是被动红外成像雷达不能达到的,也正是激光成像雷达的优势所在^[3].



(a)Picture of C130transport plane from 1 kilometer (b)Intensity image of the transport plane (c)Range image of the transport plane

图 4 利用多狭缝扫描变像管对 1 km 目标 3-D 成像
Fig. 4 The 3-D images demonstrated by MS-streak tube

3 多狭缝扫描变像管的工作原理

如图 5,多狭缝扫描变像管的工作原理与单狭缝扫描变像管的工作原理相似,不同在于光电阴极接收的是多狭缝图像,二维平面图像通过如图 6 的光纤变换器,将(a)的平面像转变为(b)的条纹像,再耦合到扫描变像管的光电阴极输入面.通过变像管的扫描在荧光屏上得到每一个狭缝随时间扫描的多个条纹像,每个条纹代表在某时刻的二维空间图

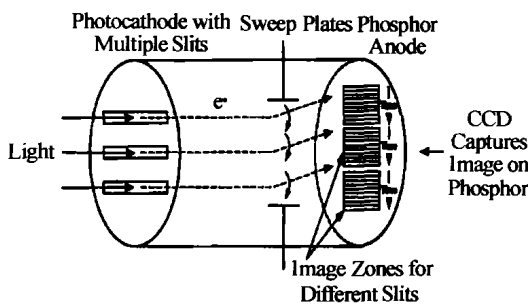


图 5 多狭缝扫描变像管
Fig. 5 The MS- streak tube

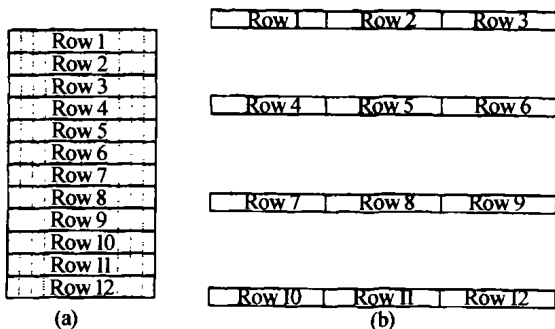


图 6 光纤变换器
Fig. 6 Design of fiber assembly for MS-STIL

像. CCD 与荧光屏耦合,捕获荧光屏上的图像,采用商用 CCD(1024 × 1024, 12bits, 取样速率为 1 MHz ~ 100 GHz),通过电路及算法实现 3D 图像的重建.

4 多狭缝扫描变像管的技术设计

4.1 时间分辨率与空间分辨率的关系

变像管时间分辨率分为物理时间分辨率和技术时间分辨率两个部分.物理时间分辨率定义为电子在变像管各部分渡越时间弥散的总效果,即

$$\tau_{物理} = \sqrt{\sum_i \tau_i^2} \tag{1}$$

技术时间分辨率定义为

$$\tau_{技术} = (\nu\sigma)^{-1} \tag{2}$$

式中,ν为扫描速度,σ为扫描方向的静态空间分辨率.总的分辨率为

$$\tau_2 = \sqrt{\tau_{物理}^2 + \tau_{技术}^2} \tag{3}$$

对于一个设计好的扫描变像管,其物理时间分辨率为定值,且 τ_{物理} 远小于 τ_{技术},因此

$$\tau_2 \cong \tau_{技术} \tag{4}$$

由于 LIDAR 系统利用激光的反射来实现目标的 3D 成像,设对目标图像的距离分辨率为 δ,则有

$$\delta = \frac{c\tau_{技术}}{2} \tag{5}$$

式中 c 为光速.如果目标图像的距离分辨率为 δ = 0.1 m,则 τ_{技术} = 6.7 × 10⁻¹⁰ s (0.67 ns).

如果扫描方向的静态空间分辨率 σ = 300 lp/cm,根据式(2)可以求出扫描速度

$$\nu = (\sigma\tau_{技术})^{-1} = (300 \times 6.7 \times 10^{-10})^{-1} = 5 \times 10^6 \text{ cm/sec}$$

4.2 技术时间分辨率与偏转灵敏度

如前所述,扫描变像管的技术时间分辨率如下式

$$\tau_{\text{技术}} = (\nu\sigma)^{-1} \quad (6)$$

$$\nu = K\varepsilon$$

式中, K 表示加在偏转系统上的扫描电压随时间变化的斜率,单位为 kV/sec , ε 表示偏转系统的偏转灵敏度,单位为 mm/kV .

偏转器是扫描变像管实现时间信息到空间信息线性转换的技术环节. 用作超短过程测量的偏转器均是电偏转. 偏转灵敏度是指单位偏转信号电压使光点在屏上产生的位移.

如图 7 为平行板静电偏转系统.

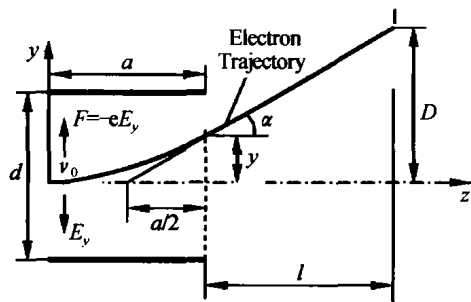


图 7 平行板静电偏转系统示意图

Fig. 7 The deflecting system with parallel plate structure

假设:电子束直径很细;电子进入偏转板时能量为 eV_0 (V_0 是阳极和阴极的电位差);偏转板间电位差 V 产生的横向电场只在偏转板区域内才存在.

偏转板之间的场强为

$$E = E_y = -\frac{V}{d}$$

其中 a 为偏转板的长度, l 为偏转板边缘到荧光屏的距离, D 为电子到达荧光屏上的偏转量.

$$D = y + l \tan \alpha = \frac{1}{2} \frac{V}{V_0} \frac{a}{d} \left(\frac{a}{2} + l \right)$$

式中 l 为偏转板边缘到荧光屏的距离.

则偏转灵敏度可表示为

$$\varepsilon = \frac{D}{V_0} = \frac{a}{2V_0 d} \left(\frac{a}{2} + l \right) \quad (7)$$

设 $a = 2 \text{ cm}$, $l = 0.4 \text{ cm}$, $d = 5 \text{ cm}$, $V_0 = 8 \text{ kV}$, 根据式(7)计算得 $\varepsilon = 1.87 \text{ cm}/\text{kV}$.

又根据式(6)计算得

$$K = \nu/\varepsilon = 5 \times 10^6 / 1.87 = 2.67 \times 10^6 \text{ kV}/\text{sec}.$$

5 设计结果

综上所述,利用多狭缝条纹管可以实现激光三维成像. 条纹管的性能直接关系到成像的准确. 通过分析计算,得出以下多狭缝扫描变像管的主要设计指标.

1) 输入窗: $\Phi 25$, 光纤面板 (OFP); 2) 光电阴极: S20; 3) 光电阴极积分灵敏度: $200 \mu\text{A}/\text{lm}$; 4) 电子光学放大率: $M = 1$; 5) 输出窗有效面积: $\Phi 25$, 光纤面板 (OFP); 6) 静态空间分辨率: $\sigma = 300 \text{ lp}/\text{cm}$; 7) 偏转灵敏度: $\varepsilon = 1.87 \text{ cm}/\text{kV}$; 8) 扫描电压随时间变化的斜率: $K = 2.67 \times 10^6 \text{ kV}/\text{sec}$; 9) 阳极加速电压: $V_0 = 8 \text{ kV}$; 10) 管子外形尺寸: $\Phi 80 \times 150$ (mm \times mm); 11) 重量: 小于 300 g ; 12) 功耗: 小于 5 W .

参考文献

- 1 Gelbart A, Redman B, et al. Flash lidar based on multiple-slit streak tube imaging lidar. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4723: 9 ~ 13
- 2 Nevis A, Hilton R J, et al. The advantages of three-dimensional electrooptic imaging sensors. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5089: 225 ~ 236
- 3 Gleckler A. Multiple-slit streak tube imaging lidar (MS-STIL) applications. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4035: 266 ~ 272

The Application of MS-streak Tube in Three-dimensional Lidar System

Zhao Baosheng, Chen Min

Xi'an Institute of Optics and precision mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

Received date: 2004-07-16

Abstract An application of MS-streak tube in three dimensional Lidar system is demonstrated. This kind of Streak Tube Imaging Lidar (STIL) can provide high-resolution 3D laser radar imagery. Compared with the traditional imaging manner, the three-dimensional Lidar system has a better definition and range resolution. Range images are affected greatly by the capability of MS-streak tube. Some parameters of MS-streak tube are designed.

Keywords Lidar; Streak tube; Temporal resolution; Spatial resolution



Zhao Baosheng was born in 1959, and graduated from Xi'an Jiaotong University in 1983. He has been engaged in the field of physical electronics and optoelectronic devices for twenty years. And now he is a professor and director of Optoelectronics Laboratory of Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Science.