

# 无扫描三维激光雷达的研究\*

严惠民 倪旭翔 陈奇霖 陆祖康

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 杭州 310027)

**提要** 介绍了基于相位法的无扫描三维激光成像雷达的原理方法,提出了正弦波与方波相关的测量方案和算法。利用微通道板像增强器研制了光电相关鉴相器面阵,建立了无扫描三维成像雷达实验装置,实验结果表明方案切实可行。

**关键词** 激光雷达, 三维成像, 相位测距

## 1 引 言

无扫描激光雷达是 90 年代出现的新型成像雷达,因没有机械扫描装置,可克服传统的扫描激光雷达帧率低、视场小、体积大等问题,具有高帧率、宽视场、坚固、体积小的特点,在军事和商业上有着广泛的应用前景。

目前无扫描激光雷达的工作原理大致可分为三类:(1) 面阵相位法<sup>[1]</sup>; (2) 面阵测时法<sup>[2]</sup>; (3) 面阵旋光法<sup>[3]</sup>。其中的关键部件是基于各自原理的面阵接收器。这三种测距原理各有其优点和局限性。原理一基本利用已有的单元技术和器件,研发成本较低,但需多次测量。原理二只需一次探测即可得到距离图像,从而可达到很高的帧率,但我国目前的微电子水平无法研制其关键器件。原理三一次探测也可测得距离,但是因电光调制晶体要求高压调制,且需要两组精确匹配的光学系统,系统稳定性欠佳,近期内没有新的发展。

我们对无扫描激光雷达系统开展了研究,预定的指标为测距范围 15 m,精度 $\pm 0.03$  m。我们提出了正弦波与方波相关的测量方案和算法。

## 2 工作原理及实验装置

系统由激光发射部分和接收部分组成,如图 1 所示。发射部分主要包括激光光源、正弦调制电路;接收部分主要包括微通道板像增强器、方波调制电路和 CCD 相机。通过在光阴极上施加合适的方波电压可实现像增强器增益的方波调制。在本系统中,由光源发出的激光照射在目标上,经目标反射后经透镜成像在光阴极上,在像增强器中与同频调制的电压信号混频,在荧光屏上输出一个对应于接收光信号和调制电信号相位差的直流光强场,从而构成光电相关器面阵<sup>[4]</sup>,然后由 CCD 面阵进行光电接收,所得的电信号经 A/D 转换后输入微机进行数据处理。

\* 国防科学预研基金及国家自然科学基金(编号:69875016)资助项目。

收稿日期:1999-11-29;收到修改稿日期:2000-03-13

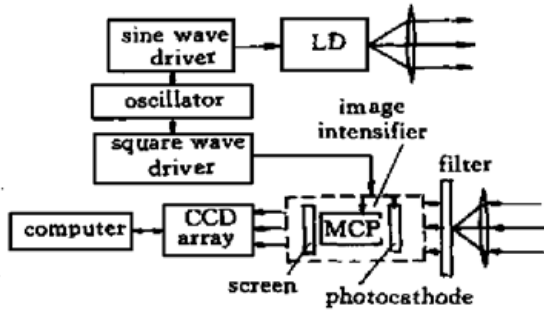


图 1 无扫描激光雷达系统的构成  
Fig. 1 Construction of scannerless laser radar system

设激光的发射功率为

$$P = P_0(1 + m_0 \sin \omega t) \quad (1)$$

$P_0$  为平均功率,  $m_0$  为调制系数,  $\omega = 2\pi f$  为调制角频率。

从目标反射后的光信号的相位延迟为  $\phi = \frac{2\omega r}{c}$ ,  $r$  为目标至测量系统的距离,  $c$  为光速, 其功率为

$$P_r(x, y) = k(x, y) P_0 \{ 1 + m_0 \sin[\omega t + \phi(x, y)] \} \quad (2)$$

$k$  为衰减系数。像增强器增益  $G$  (方波) 的傅里叶级数表示式为

$$G = G_0 \left[ 1 + \sum_{n=0}^{\infty} m_{2n+1} \sin(2n+1)\omega t \right] \quad (3)$$

$G_0$  为常数,  $m_{2n+1}$  为方波的傅里叶展开系数。

当方波与正弦波同相时, 像增强器上荧光屏输出的光场为

$$E(x, y) = P_r(x, y) G = k(x, y) P_0 G_0 \left[ 1 + \frac{1}{2} m_0 m_1 \cos \phi + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\omega t + \phi_n) \right] \quad (4)$$

$a_n$  和  $\phi_n$  为谐波幅度和相位。CCD 相机接收荧光屏上的图像, 曝光时间控制为调制周期  $T$  的整数倍  $n$ , 以平滑所有谐波分量, 其输出为

$$O_1 = \int_0^T E(x, y) dt = nT k(x, y) P_0 G_0 \left[ 1 + \frac{1}{2} m_0 m_1 \cos \phi(x, y) \right] \quad (5)$$

为了求得相位  $\phi$ , 采用三次测量法, 再测量反相方波调制和正交方波调制的结果, 分别为

$$O_2 = nT k(x, y) P_0 G_0 \left[ 1 - \frac{1}{2} m_0 m_1 \cos \phi(x, y) \right] \quad (6)$$

$$O_3 = nT k(x, y) P_0 G_0 \left[ 1 + \frac{1}{2} m_0 m_1 \sin \phi(x, y) \right] \quad (7)$$

$O_1, O_2, O_3$  经量化器转换后为  $S_1, S_2, S_3$ , 由此可得

$$r = \frac{R}{2\pi} \arctan \phi = \frac{R}{2\pi} \arctan \frac{2S_3 - (S_1 + S_2)}{S_1 - S_2} \quad (8)$$

$R = c/f$ , 为调制波长。最大测量距离控制在  $R$  的一半。

### 3 实验结果

#### 3.1 单点测距实验

在进行成像测距之前首先进行了单点测距实验, 在该实验中随机选择荧光屏上的一点用高性能的光电倍增管接收, 用 3 位半的电压表作为量化器。分别在室内、室外对从反射率为 0.1~0.9 的目标进行了测距实验。实验结果如图 2 所示。

对测量点进行计算机拟合处理可得:  $Y = 0.754 + 1.006X$ ,  $Y$  为测量距离,  $X$  为标称距离, 相关系数

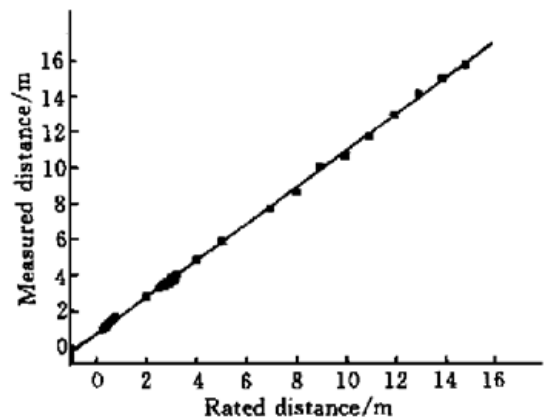


图 2 单点测距实验中的测量距离与标称距离关系

Fig. 2 Measured distance vs rated distance in ranging experiment

为 1.000, 标准差为 0.090。其中 0.754 m 的系统误差主要由电路的固定相位延迟造成, 可以通过标定来解决。

### 3.2 成像测距实验

在单点测距实验的基础上, 又进行了成像测距实验, 相位光场用 KODAK 公司的 MEGAPLUS 数码 CCD 相机(8 位分辨率)接收。成像测距与单点测距最大的区别是, 反射信号动态范围较大, 超出了接收器件的线性工作范围, 有些点的信号不够强, 而有些点的信号过强, 造成这些点的解调无效。

图 3 和图 4 是两个不同景物的测量结果。右图为常规意义下的景物强度图。左图为距离图, 是视场内物体的距离信息, 图中不同的灰度代表不同的距离, 灰度小代表距离近; 灰度大代表距离远。



图 3 成像测距实验中的景物 1

左图为距离图, 右图为景物图

Fig. 3 An experiment result of ranging image  
the left is range picture, the right is object picture



图 4 成像测距实验中的景物 2

左图为距离图, 右图为景物图

Fig. 4 An experiment result of ranging image  
the left is range picture, the right is object picture

图 3 中 A 为 15 m 处的木板, B 为 8 m 处的木板, C 为 6 m 处的足球和纸箱, D 为 5 m 处的凳子。木板 A 上半部分为白色, 具有较大的反射率, 下半部分为灰色, 反射率较小。尽管木板上下两部分反射率不同, 在距离图上显示的测量结果是相同的。足球 C 在距离图上有几部分未能准确测量, 这是由于黑色的表面反射率太小, 所接收的信号信噪比太低造成的。

图 4 中 A 为 10 m 处的木板, B 为 8 m 处的木板, C 为 5 m 处的足球和凳子。可以看出, 凳子约 2 cm 宽的横档清晰可辨。

在上述两图中, 有多块等距离区, 在这些区域可进行距离测量值的统计分析。经计算成像测距随机误差的标准差在 0.08~ 0.28 m 之间。从实验结果可以看出, 与单点测距精度相比, 成像测距的精度有所下降。

## 4 成像测距误差分析

相位法测距的精度分析已有文献可参考, 这里仅分析成像测距系统的精度退化。设距离计算公式(8)中的  $S_1, S_2, S_3$  是等精度测量, 即有  $\Delta S_1 \approx \Delta S_2 \approx \Delta S_3 = \Delta S$ , 由误差理论可知

$$\Delta r = \frac{\Delta S}{S_0} \times \frac{R}{2\pi n_0 m_1} [|\sin\phi_+ \cos\phi_+| + |\sin\phi_- \cos\phi_-| + |2\cos\phi|] \quad (9)$$

上式中  $S_0$  是信号中值。尽管  $m_0, m_1$  在计算距离时并不显式表达(理论上可约掉), 但由上式可知大的调制系数  $m_0, m_1$  可以减小测距误差。采用方波调制的优点是它的基频调制度  $m_1$  为  $4/\pi = 1.27$ , 突破正弦调制的上限 1。考虑到实际正弦调制时  $m_1$  小于 1, 因此方波调制具有明显优势。

在公式(9)中  $m_0$  实测为 0.8,  $m_1$  取 1.2, 系统的  $R$  为 30 m。不考虑  $\Delta S/S_0$  时在全程范围内  $\Delta r$  在 9~18 m 之间变化, 方差为 14 m。在单点测距系统中, 用 3 位半电压表读数时实际最大信号接近 1000 个字, 信号不确定性不大于 2 个字, 即  $\Delta S/S_0$  不大于  $2/(1000/2)$ , 则测距误差在 0.04~0.07 m, 方差 0.06, 这与实验结果比较符合。光电倍增管加电压表的误差经单独考核不大于 1 个字, 因此, 单点测距系统的误差可认为主要来自激光光源和像增强器部分。

现考虑 CCD 相机的影响。对于 CCD 相机输出信号本身的  $\Delta S$  通过连续重复测量其方差约为 1, 分辨率为 8 位, 取中心为 100, 仅这一项产生的误差约 0.1~0.2 m。再考虑激光光源和像增强器部分的误差 0.04~0.07 m, 总误差 0.14~0.27 m 与实际实验结果非常吻合。

我们研制的无扫描激光雷达系统, 已完成实验论证, 测量结果达到了预定指标, 并且与所选器件所能取得的精度相符。要进一步提高系统的性能, 应采用大动态范围和低噪声的像增强器及 CCD 相机, 荧光屏和 CCD 相机之间的耦合应用光纤面板直接耦合, 以提高耦合效率。

### 参 考 文 献

- 1 Phil Garcia, John Anthes, Joe T. Pierce *et al.*. Characterization of a scannerless lidar system. *SPIE*, 1993, **1936**: 23~30
- 2 Richard Richmond, Roger Stettner, Howard Bailey. Laser radar focal plane array for three-dimensional imaging. *SPIE*, 1996, **2748**: 61~67
- 3 P. F. McManamon. Laser radar development. *SPIE*, 1998, **3380**: 50~57
- 4 Yan Huimin, Lu Zukang, Chen Qilin. A photo-electronic correlator array based on microchannel plate image intensifier. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1999, **28**(3): 227~229 (in Chinese)

## Study of Scannerless Laser Radar

Yan Huimin Ni Xuxiang Chen Qilin Lu Zukang

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract** In this paper is presented a scannerless imaging radar system based on parallel phase discrimination. Using correlation between sinusoidal wave and square wave is proposed. A discrimination array implemented with image intensifier is described. The results of experiments prove the feasibility of our idea.

**Key words** laser radar, three-dimensional imaging, phase range