

# 半正弦波相关型三维激光雷达

张秀达<sup>a,b</sup>, 严惠民<sup>a,b</sup>, 羊华军<sup>a,b</sup>, 李燕<sup>a,b</sup>

(浙江大学 a. 现代光学仪器国家重点实验室; b. 国家光学仪器工程技术研究中心, 杭州 310027)

**摘 要:**提出了基于半正弦波-方波相关法的凝视成像三维激光雷达. 用傅里叶级数展开对新方法进行了分析. 理论分析表明, 半正弦-方波相关可以在抑制高频噪音的同时加大调制的交流分量. 基于新相关方法的探测系统可以在不损失测距准确度的条件下可以获得更大的输出光功率从而获得更大的探测距离. 采用基于新方法的探测装置对~70 m 外约 100 m<sup>2</sup> 的目标进行了探测实验. 实验结果表明, 基于新方法的激光雷达在 60 m 处的分辨率约为 0.3 m, 从而验证了理论分析的结论.

**关键词:**半正弦波; 凝视激光雷达; 调制深度; 三维成像

中图分类号: O438.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)02-255-4

## 0 引言

三维激光雷达广泛应用于三维建模、遥感技术<sup>[1]</sup>、空间器对接<sup>[2]</sup>和飞行器表面覆层裂缝检测<sup>[3]</sup>等各个方面. 凝视激光雷达具有体积小、可靠性高的特点, 在国外得到了广泛的发展, 但国内相关研究较少. 严惠民在 2000 年前后曾经研制过无扫描激光雷达<sup>[4]</sup>, 激光器的出射功率为 200 mW, 测量距离为 15 m, 测量准确度约 0.3 m, 分辨率为 700×500; 国防科技大学秦石乔等研制了脉冲扫描式三维雷达<sup>[5]</sup>, 测量距离为 24 m, 分辨率为 16×101; 此外, 还有采用条纹管等器件进行的三维成像方法<sup>[6]</sup>. 其中以相位相关法的空间分辨率最高. 然而由于受到半导体激光器出射功率的影响, 采用相关法的凝视三维激光雷达性能提高缓慢. 如果能够提高半导体激光器的调制深度和调制频率, 则可以提高测量的距离和距离的分辨率. 由于半正弦调制电路较正弦调制电路可以减小调制电路的发热量和输出功率效率, 因此可以比正弦调制获得更大的输出功率. 本文通过对相关法测距过程进行分析, 提出了半正弦波-方波的新型相关三维测距法, 给出了测距方法的理论分析, 并进行相关测距试验.

## 1 工作原理

如图 1, 信号发生器产生两路具有一定固定相位差的同频调制信号. 一路控制半导体激光器出射调制光强, 另一路控制像增强器的增益. 半导体二极管激光器发出激光后经过物体反手后经过成像透镜, 经过像增强器放大后输出, 最后为 CCD 摄像机所收集. 利用数字图像处理对不同相移条件下得

到的不同强度图像进行计算就可以获得图像各点对应的距离.

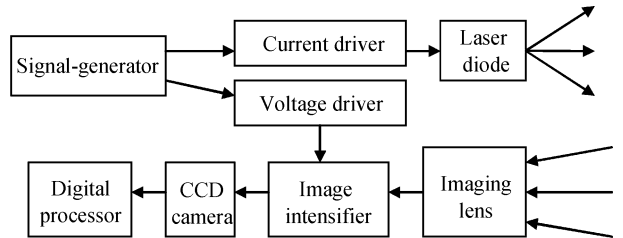


图 1 三维凝视雷达原理图

Fig. 1 Scheme of fixing 3D lidar

## 2 理论分析

由于通常 CCD 的积分时间远远大于调制信号周期, 这样可以知道 CCD 所得到的其中任意一点  $(x, y)$  的光强为

$$I_{x,y}(\varphi_i) = \gamma_{x,y} \int_0^{nT} P_{x,y}(\omega t) G[\omega(t+t_{x,y}) + \varphi_i] dt \quad (1)$$

式中:  $\gamma_{x,y}$  是和该点有关的常量和物体反射率和大气损耗等有关,  $T$  是调制信号周期,  $n$  是积分的周期数目, 且  $n \geq 1$ ,  $\omega$  是调制信号角频率,  $P_{x,y}(\omega t)$  是像增强器某点区域收集到的半导体激光器发出的光功率时间函数,  $G(\omega t)$  像增强器增益随时间函数,  $t_{x,y}$  为光从激光器到像增强器的飞行时间,  $\varphi_i$  为信号发生器发出的两路信号相位差.

通过一系列的相移  $\varphi_i$ , 则可以得到一系列的方程组, 从而解出飞行时间  $t_{x,y}$ . 然后根据距离时间关系式得出每点的距离为

$$Z_{x,y} = \frac{t_{x,y} C}{2} \quad (2)$$

式中:  $C$  为光速. 正弦-正弦相关和正弦-方波相关的具体分析见文献[4, 7]. 半导体发出的半正弦激光功率为

$$P(\omega t) = \frac{P_0}{2} [\cos(\omega t) + |\cos(\omega t)|] \quad (3)$$

式中:  $P_0$  是激光最大出射功率,  $||$  表示绝对值.

根据雷达方程, 像增强器输入端某点接收的回波能量为

$$P_{x,y}(\omega t) = \frac{D^2 S_{x,y}}{Z_{x,y}^2 S} \gamma_{x,y} \eta P(\omega t + \omega t_{x,y}) \quad (4)$$

式中:  $D$  是接收端有效通光孔径,  $S_{x,y}$  是对应探测点的反射角面积,  $Z_{x,y}$  是对应探测点的距离,  $S$  是激光照射的总角面积,  $\gamma$  是对应探测点的反射率,  $\eta$  是光学成像器件的通光效率.

而接收器增益为

$$G(\omega t) = \text{Rect}\left(\frac{\omega t + \varphi_i}{\pi}\right) \quad (5)$$

于是半正弦波-方波相关时 CCD 某点接收的光强为

$$I_{x,y}(\omega t_{x,y}, \varphi) = \frac{D^2 S_{x,y}}{Z_{x,y}^2 S} \gamma_{x,y} \eta P_0 \int_0^{nT} [\cos(\omega t + \omega t_{x,y}) + |\cos(\omega t + \omega t_{x,y})|] \text{Rect}\left(\frac{\omega t + \varphi}{\pi}\right) dt \quad (6)$$

为了分析式(6), 将式(3)、(5)分别用傅里叶级数展开

$$\cos(x) + |\cos(x)| = \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2}\cos(x) + \frac{2}{3\pi}\cos(2x) - \frac{2}{15\pi}\cos(4x) + \dots \quad (7)$$

$$\text{Rect}(x) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi}\cos(x) - \frac{2}{3\pi}\cos(3x) + \frac{2}{5\pi}\cos(5x) - \dots \quad (8)$$

由于有正交条件

$$\int_0^{nT} \cos(ax)\cos(bx + \varphi) dx \ll T; a \neq b, n \gg 1 \quad (9)$$

因此不同倍频之间的相关将可以忽略, 而前两项需要考虑, 式(6)可以简化为

$$I_{x,y}(\varphi_i) = \frac{D^2 S_{x,y}}{2\pi Z_{x,y}^2 S} \gamma_{x,y} \eta P_0 nT [1 + \cos(\omega t_{x,y} - \varphi_i)] \quad (10)$$

可以看到, 在半正弦调制下, 调制深度为 1. 而正弦波-正弦波, 正弦波-正弦波相关的调制深度最大分别为 0.5 和  $\frac{\pi}{4}$ . 由于半正弦波-方波相关法的光强-相位关系表达式完全相同, 它们的移像解出距离的过程相同, 因此我们略去具体的推导过程只给出最终的结果.

每点的距离分别为

$$z_{x,y} = \arctan \left[ \frac{I_{x,y}(\frac{\pi}{2}) - I_{x,y}(\frac{3\pi}{2})}{I_{x,y}(0) - I_{x,y}(\pi)} \right] C / (2\omega) \quad (11)$$

式中  $I_{x,y}\pi$  表示移动某个相位测得的光强.

测距误差为

$$\Delta Z = \beta \frac{\Delta I_{x,y}}{I_{x,y}} [|\sin(\omega t_{x,y}) + \cos(\omega t_{x,y})| +$$

$$|\sin(\omega t_{x,y}) - \cos(\omega t_{x,y})| + |2\cos(\omega t_{x,y})|] \quad (12)$$

式中:  $\Delta Z$  是测距误差,  $\beta$  是与不同强度图间的对比度成正比的固定常量,  $\Delta I_{x,y}$  是 CCD 收集到的光强噪声.

由推导可知, 半正弦波可以抑制方波的奇数倍频分量, 方波可以抑制半正弦波的偶数倍频分量, 有效地消除了高频分量的影响, 使得半正弦波-方波相关的结果和正弦波-正弦波相关法测距的求解距离表达式完全相同一样. 因此从理想的理论模型来看, 半正弦波-方波的相关方法可以在不损失准确度的情况下利用 CCD 更大的动态范围, 从而可以在同样光功率的情况下获得更高的准确度或更大的量程.

### 3 试验结果与分析

利用半正弦波调制法, 获得了 3 MHz 重复频率、峰值出射功率 5 W, 三次谐波能量小于基波能量 25 dB 的半导体激光输出. 其他主要器件的参量为: MCP 的分辨率为 25 lp/mm, 直径 18 mm; CCD 分辨率为  $1024 \times 768$ , 16 位灰度; 成像镜头焦距 50 mm, F 数 1.7.

本文依次对 5~50 m 每隔 1 m 的白色平板进行测量, 分别对  $10 \times 10$  像素区域处理得到的结果如图 2. 其中横坐标是被测平板距离, 纵坐标是系统测得距离和真实距离的差值, 可以看到, 测量误差小于 0.2 m.

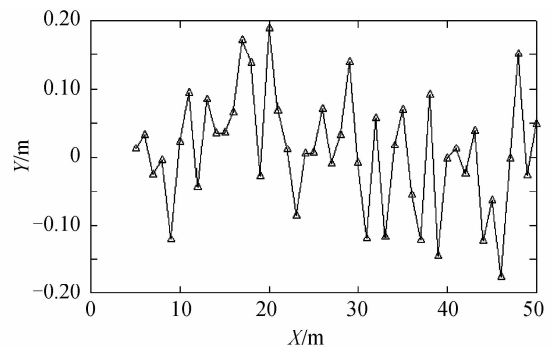


图 2 距离测量准确度

Fig. 2 Distant measurement precision

本文对 20~70 m 处的建筑进行户外测试. 由于调制频率为 3 MHz, 系统的量程为 50 m, 为了能够对全部目标进行测量, 选择了 20~70 m 的测量区间来进行探测. 实验的结果如图 3.

在距离图像上显示出系统具有良好的测距准确度, 对带窗的墙壁测得的距离连续清晰, 瓦片的凹入部分可以清晰分辨, 这都是强度图像无法提供的信息. 为了了解不同强度对探测准确度的影响, 对同一场景里的静止目标进行了 10 次的测量, 对不同亮度的区域进行误差分析, 结果如表 1.

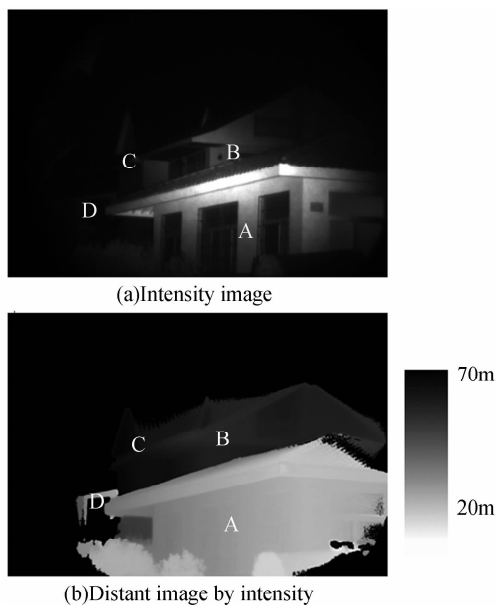


图3 凝视测距成像实验结果

Fig. 3 Experimental result of fixing distant imaging

表1 对 A、B、C 区域的测距统计结果

区域	测得的平均 距离/m	实际 距离/m	误差 /m	数据标 准差
A	31.88	31.76	+0.12	0.09
B	61.49	61.30	+0.19	0.17
C	66.57	66.85	-0.28	0.26

由于 C 区域的测量误差较大,而 A、B 区域亮度较高测量误差相对较小.结合图 2 的测量结果来看,可以认为影响测量准确度的主要因素是 CCD 的测量准确度.由于 C 区域的灰度值较低,因此 CCD 的测量相对噪音较大,从而产生了相对大的误差.因此,提高出射功率对探测远距离目标是非常必要的.同时,由于调制频率(3 MHz)较文献[2](5 MHz)低,量程相对较大,测量的准确度和文献[2]接近,也验证了理论的结果.这表明新的方法确实可以在基本不降低测量准确度的同时将测量距离提高了 4 倍.

区域 D 产生了测量错误,这是因为物体距离过远,超过了 70 m 的最大测量范围导致的相位一个周期误差.

## 4 结论

理论分析和实验结果都表明,半正弦波-方波相关凝视测距法可以在不降低测距准确度的同时有效地增加探测器的量程.使得凝视激光雷达的探测距离达到了 50 m 以上,准确度好于 0.3 m,达到了预期的目标.由于目前出射功率数百瓦的半导体堆叠已经商业化,如果能将它应用在凝视激光雷达中并配合合理工作方式,则可以将探测距离提高到数公里;针对周期相位误差的问题,可以采用不同频率同时测量的方法来消除等.

### 参考文献

- [1] YOU Hong-jian, SU Lin, LI Shu-kai. 3D building reconstruction based on scanning laser rangefinder data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, **20**(4): 381-385.  
尤红建, 苏林, 李树楷. 基于扫描激光测距数据的建筑物三维重建[J]. *遥感技术与应用*, 2005, **20**(4): 381-385.
- [2] HABBIT R D Jr, NELLUMS R O, NIESE A D, *et al.* Rodriguez, utilization of flash lidar for cooperative & uncooperative rendezvous and capture[C]. *SPIE*, 2003, **5088**: 146-157.
- [3] ROBERT O, HABBIT R D Jr, HEYING M R, *et al.* 3D scannerless LADAR for orbiter inspection[C]. *SPIE*, 2006, **6220**:G1-G17.
- [4] YAN Hui-min, LU Zu-kang, CHEN Qi-lin. A photo electronic correlator array based on microchannel plate image intensifier [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(3):227-229.  
严惠民, 陆祖康, 陈奇霖. 利用象增强器构成光电相关鉴相器面阵的研究[J]. *光子学报*, 1999, **28**(3):227-229.
- [5] HU Chun-sheng, QIN Shi-qiao, WANG Xing-shu. An extremely fast and high-power laser diode driver module[C]. *SPIE*, 2005, **5628**:12-17.
- [6] ZHAO Bao-sheng, CHEN Min. The application of MS-streak tube in three-dimensional lidar system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12):P1425-1427.  
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.
- [7] MONSON T C, GRANTHAM J W, CHILDRESS S W. Characterization of scannerless lidar [C]. *SPIE* 1999, **3707**: 409-420.

## Fixing Laser Radar Based on Half-sine Correlation Method

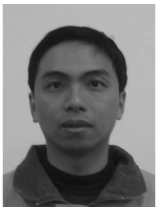
ZHANG Xiu-da<sup>a,b</sup>, YAN Hui-min<sup>a,b</sup>, YANG Hua-jun<sup>a,b</sup>, LI Yan<sup>a,b</sup>

(*a. State Key Laboratory of Modern Optical Instrument ; b. NERC for Optical Instrumental ,  
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Received date: 2007-02-13

**Abstract:** Fixing imaging 3D laser radar based on half-sine to rectangle correlation method was presented. Fourier series were employed to analyze half-sine to rectangle correction process. Theoretical analysis shows that half-sine to rectangle correlation can suppress high frequency noise and increase alternative component of modulation at the same time. The new method can achieve larger laser output power, longer measuring range while without suffering accuracy decrease. 100 square meters targets in a distant about 20 ~ 70 m were detected by equipment based on the new method. The experiment shows that laser radar based on new method get an accuracy about 0.3 meters in a distance about 60 meters. The experiment result verifies the theory result.

**Key words:** Half-sin wave; Fixing laser radar; Modulation depth; 3D Imaging



**ZHANG Xiu-da** was born in 1979. Now he is a Ph. D candidate at Optical Engineering Department, Zhejiang University, and his research interests focus on three space dimensional imaging, precision optical measurement.