

三维无扫描成像激光雷达原理改进与仿真

邓志辉, 杨华军, 朱颖

(电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要:提出了基于半方波-方波相关法的三维成像激光雷达。介绍了测量方案推导了算法。并用 Matlab 的 Simulink 工具对测距原理进行了仿真,还对测距精度进行了分析。理论分析表明,半方波-方波相关可以使调制深度均达到 1.2,能极大地提高空间分辨率。仿真证明了此相位法的正确性,为实际三维成像激光雷达的研制奠定了基础。

关键词:激光雷达;调制深度;半方波;Simulink 仿真

中图分类号:TN958.98 **文献标识码:**A

Improvement and simulation of 3D scannerless imaging lidar

DENG Zhi-hui, YANG Hua-jun, ZHU Ying

(College of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: 3D imaging lidar based on half-square to square correlation method is proposed. The architecture of the system and the principle of phase ranging algorithm are discussed with Matlab simulink. The imaging precision is also analyzed. The simulation shows that this algorithms and principles are correct and effective. The modulation depth is greater than 1.2. The simulation verifies the work theory of scannerless 3D imaging lidar. It is useful for the research and design of the practical 3D imaging lidar.

Key words: lidar; modulation depth; half-square wave; Simulink simulation

1 引言

无扫描三维激光雷达是 20 世纪 90 年代出现的新型成像雷达,具有全天时高精度三维成像的主动探测手段,在军事领域和空间对接等诸多领域有广泛的应用。目前的无扫描三维激光雷达工作原理中相位相关法的空间分辨率最高。为了获得更高的分辨率,一个总的指导原则^[1]是,增加激光调制的交流分量即调制深度。国际上,自 20 世纪 90 年代开始,美国的 Sanida 国家实验室开展了连续光源的主动成像式三维激光雷达工作,他们研制成功了基于正弦相关法的无扫描三维主动成像激光雷达^[2],调制深度最大为 0.5 和 0.79。在国内,浙江大学严惠民教授等也开展了类似的工作并研制成功基于余弦-方波相关法的无扫描三维激光雷达,调制深度为 0.8 和 1.2。于是在总结他们工作的基础之上进

一步提出了相位相关法即半方波-方波法。调制深度可以达到 1.2 和 1.2 介绍了这种方法的原理与算法,用仿真工具 Simulink 对系统进行了仿真,并分析了影响测距精度的因素。

2 无扫描激光雷达系统结构

该系统由激光发射与接收两部分组成,如图 1 所示,发射部分主要包括激光光源调制电路,在方波发生电路之后放置一低通滤波器,取出方波的一次谐波对激光光源进行调制;接收部分主要包括微通道板像增强器、方波调制电路、CCD 相机。在光阴极加上同频方波调制电压,如图 1 所示由激光照射在目标上,经过目标反射后经透镜成像在光阴极上,

作者简介:邓志辉(1986-),男,硕士,主要从事光通信,三维激光雷达的研究。E-mail:woshidengzhihui@163.com

收稿日期:2010-12-07;**修订日期:**2011-01-06

在像增强器中与同频调制的电压信号混频,在荧光屏输出一个对应于接受光信号和调制电信号相位差的直流光强场,从而构成光电并行鉴相器面阵,然后由 CCD 面阵进行光电接收,所得信号送入计算机进行处理。

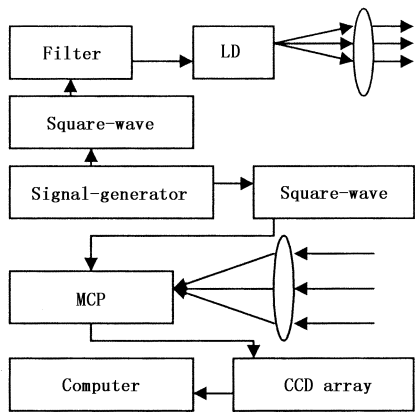


图1 无扫描激光雷达系统的构成

信号发生器产生振幅为 1、占空比为 1:1 的方波,以下的方波全部用其傅里叶展开式来表示。

方波的傅里叶展开式为:

$$f(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{i=0}^{+\infty} \frac{1}{2i+1} \sin(2i+1)wt \quad (1)$$

式中, $w = 2\pi f$ 为调制角频率,滤波器的作用是取出一次谐波滤除所有的三次及三次以上高频分量。再对光源进行调制,这样可以得到的激光发射功率为:

$$P_0 = \overline{P_0} \left[1 + \frac{4}{\pi} \sin(wt) \right] \quad (2)$$

式中, $\overline{P_0}$ 为平均功率。从目标反射后的相位延迟为 $\Delta\varphi = 2wr/c$, r 为目标到测量系统的距离, c 为光速。从目标反射回来的激光功率为:

$$P_r(x, y) = m(x, y) \overline{P_0} \left[1 + \frac{4}{\pi} \sin(wt + \Delta\varphi) \right] \quad (3)$$

式中, $m(x, y)$ 为衰减系数。像增强器采用同频方波调制后,其增益 G (方波) 用傅氏级数展开为正弦级数:

$$G = \overline{G} \left\{ 1 + \frac{4}{\pi} \sum_{i=0}^{+\infty} \sin(2i+1)(wt - \phi) \right\} \quad (4)$$

式中, \overline{G} 为常数; ϕ 为可人为调节的相位。回波通过 MCP 后,由 CCD 进行积分运算, CCD 的每个像元都是对应回波的积分,设积分时间为信号周期 T 的 n 倍,则每个像素的输出值为:

$$I = \int_0^{nT} P_r(x, y) G dt \quad (5)$$

当 MCP 的增益(参考信号)与发射信号具有相

同的频率和相位即 $\phi = 0$ 时,每个像素的值为:

$$I = \int_0^{nT} P(x, y)_r G dt = \overline{P}(x, y)_r \overline{G} nT \times \left\{ 1 + \frac{1}{2} m_0 m_1 \cos(\Delta\varphi) \right\} \quad (6)$$

式中, m_0 和 m_1 均为 $\frac{4}{\pi}$, 以上得出的是在 MCP 调制下的结果。在没有调制的情况下,重复测量, $G = \overline{G}$ 。则 CCD 的一个像素积分值为:

$$I_0 = \overline{P}_r \overline{G} nT \quad (7)$$

式(6)除以式(7)可得:

$$\frac{I}{I_0} = 1 + \frac{1}{2} m_0 m_1 \cos(\Delta\varphi) \quad (8)$$

从而得到个点对应的相位值 $\Delta\varphi$, 再代入 $r = \frac{c\Delta\varphi}{2w}$

就可得到目标各点的距离值。

3 相位法三维激光雷达原理仿真

为了验证上述原理和分析测距过程当中存在的误差,在 Matlab 中对点目标进行了测距以及误差仿真^[3]。

3.1 Simulink 下的测距仿真

相位测量只能在 2π 之内才是单值的,为避免多值性。最大测量距离不能超过调制周期波长一半^[4]。如图 2 所示,调制频率这里选为 15 MHz 即半波长为 10 m,这里只对 10 m 之内测距,用时间延迟模块来模拟信号的飞行时间,飞行时间取为 6.667×10^{-8} s 即一个周期。在这里做积分的时间控制为调制周期 T 的 10 倍,积分时间和仿真时间同为 6.6667×10^{-7} s,用 SCOPE 模块来显示波形和结果。为了达到良好的滤波效果,这里采用 100 阶 Butterworth 低通滤波器滤波。Product 模块的作用相当于像增强器,Integrator 模块相当于 CCD。

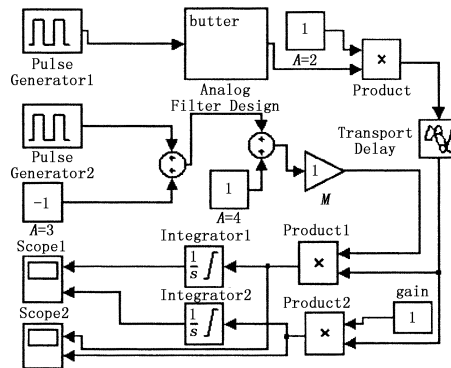


图2 相位法仿真模型

如图 3 所示为回波信号与参考信号混频之后的波形图,经 CCD 积分后如图 4 所示, $I = 1.0861 \times$

10^{-6} 为有方波调制 MCP 的积分值, $I_0 = 6 \times 10^{-7}$ 为无方波调制时的积分值。把这两个值代入式(8)可得 $\cos(\Delta\varphi) = 0.9996$, 在误差允许的情况下, 在这里可以看做 $\cos(\Delta\varphi) \approx 1$, 再代入 $r = \frac{c\Delta\varphi}{2w}$ 即可得 $r = 10 \text{ m}$, 由此证明了此模型的正确性。

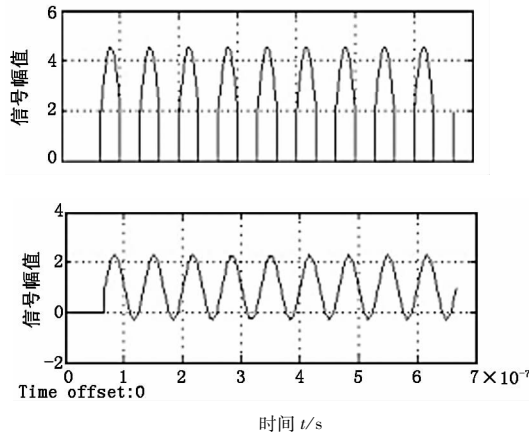


图3 混频后波形

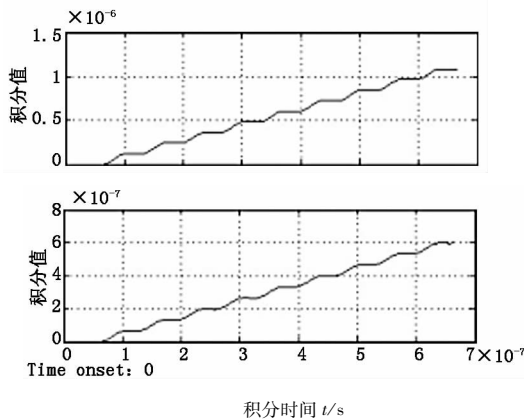


图4 积分值示意图

3.2 误差分析

应用以上同样的算法, 利用 Matlab 对成像精度进行仿真, 分析误差的原因及解决办法。相位测距的精度分析已有文献可考^[5]。由误差理论可知:

$$\Delta r = \frac{\Delta I}{I} \times \frac{R}{2\pi m_0 m_1} [|\sin(\Delta\varphi) + \cos(\Delta\varphi)| + |\sin(\Delta\varphi) - \cos(\Delta\varphi)| + |2\cos(\Delta\varphi)|] \quad (9)$$

式中, Δr 为测距误差; ΔI 为 CCD 收集到的光强噪音; I 为光强平均值; $R = \frac{c}{f}$ 为调制波长。如图 5 所示调制深度越大则测距精度越高。从式(9)可以看出, m_0 和 m_1 在计算距离时并不显式表达(理论上可以约掉), 但由式(9)可知大的调制系数 m_0, m_1 可以减小测距误差。采用半方波-方波调制的优点是

它的一次谐波调制度 $m_0 = m_1 = \frac{4}{\pi}$, 突破正弦调制的上限 1, 因此具有优势。浙江大学的张秀达余弦-方波法调制深度为 $m_0 = 0.8$ 和 $m_1 = 1.2$, 结合实践, 用半方波-方波相关法调制深度至少可以达到 $m_0 = m_1 = 1.2$, 所以可以在他的基础之上提高 50% 的误差精度, 由此可大幅提高三维激光雷达的空间分辨率。现考虑 CCD 引入的误差, 如图 6 所示, $K = \left| \frac{\Delta I}{I} \right|$ 为光强波动百分比, 这里可以用高斯随机变量来模拟。当 $K \leq \frac{1}{10^4}$ 时, 测距误差才急剧减小。要使测距精度达到毫米量级, CCD 相机的位数至少为 10 位。

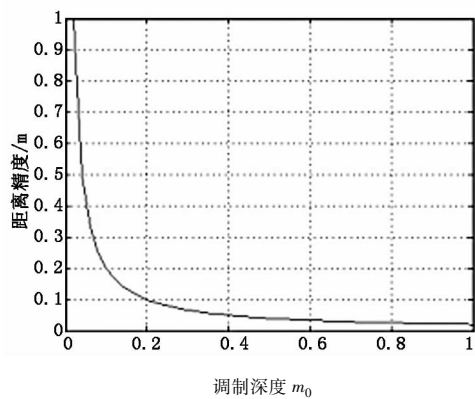


图5 距离精度与调制深度的关系

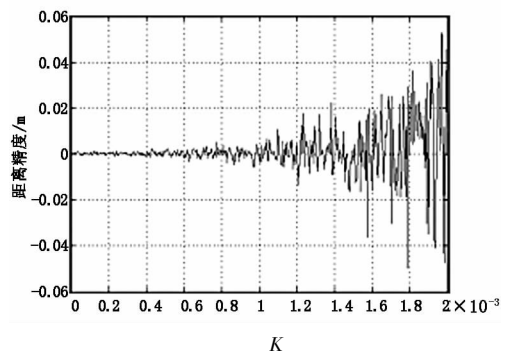


图6 K 与距离误差的关系

4 结束语

无扫描三维激光雷达成像速率高, 可得到高分辨率、高帧率的视频图像, 适合三维空间信息快速获取的需求。以上对三维激光雷达的关键技术进行了改进, 仿真结果证明半方波-方波相位测距法在不降低帧速的情况下, 可以获得更高的测距精度, 但是增加了系统复杂性和成本。

参考文献:

[1] Zhang Xiuda, Yan Huimin, Yang Hua-jun, et al. Fixing la-

- ser radar Based on half-sine correlation method[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(2): 254 - 258. (in Chinese)
- 张秀达, 严惠民, 羊华军, 等. 半正弦相关型三维激光雷达[J]. 光子学报, 2009, 38(2): 254 - 258.
- [2] Muguira M R. Scannerless range imaging with a square wave[C]//Proceedins of SPIE, 2004, 2472(106): 10. 1117/12. 212017.
- [3] Zhang Xiuda. Studies on the new three-dimensional active optical imaging theory and system[D]. Hangzhou: Zhejiang, 2008. (in Chinese)
- 张秀达. 新型三维主动光学成像理论与系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [4] Li Fangfei, Zhang Keshu, Gong Qiang. 3D Scannerless imaging LiDAR: principles and simulations[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(8): 19 - 22. (in Chinese)
- 李芳菲, 张珂殊, 龚强. 无扫描三维成像激光雷达原理分析与成像仿真[J]. 科技导报, 2009, 27(8): 19 - 22.
- [5] Yan Huimin, Ni Xuxiang, Chen Qilin, et al. Study of scannerless laser radar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(9): 861 - 864. (in Chinese)
- 严惠民, 倪旭翔, 陈奇霖, 等. 无扫描三维激光雷达的研究[J]. 中国激光, 2000, 27(9): 861 - 864.