

TDI CCD 在面阵成像三维激光雷达中的应用

郑秋贞, 杨华军, 李 东, 朱 颖

(电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要 为了提高双通道增益调制型面阵成像三维激光雷达系统的测距精度,从系统结构的紧凑性方面考虑,基于 TDI CCD 能够利用驱动电路对同一点多级曝光信息进行累积的工作原理,提出了使用 TDI CCD 代替传统的 CCD 作为光脉冲探测器。根据该三维激光雷达测距原理,导出了成像系统测距公式和距离精度公式。研究了 TDI CCD 的级数和速度失配绝对误差对测距精度以及调制传递函数(MTF)的影响。分析结果表明:该方法不仅能使测距精度提高到原来的 \sqrt{M} 倍,同时能舍弃额外的运动补偿装置,进行精确的前向运动补偿。

关键词 TDI CCD;增益调制;运动补偿;测距精度

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.02.009

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)02-0043-04

随着激光测距雷达系统重要性的进一步突显,传统的点扫描式激光雷达已不能满足人们对激光雷达三维成像速度以及测距精度的要求。面阵 CCD 技术的发展,使得面阵三维成像应运而生。面阵激光雷达技术因为没有扫描结构,所以整机的结构紧凑,并且具有捕获速度快、信息量大等特点逐渐成为广大研究者关注的对象。双通道增益调制型面阵三维成像激光雷达由于其测距原理简单,测距精度高,且与脉冲形状无关等特点,将成为面阵激光雷达的发展趋势^[1-2]。

目前面阵激光雷达测距方式大致可以分为两类^[2-3]:①直接测距型,通过探测光脉冲往返时间来获得目标的距离;②间接测距型,利用一个二维面阵探测器接收反射激光信号得到强度图,再将强度图解调获得目标的距离信息。直接测距型面阵激光雷达,由于受工艺的研制,存在成像像素不高,视场角不大等缺点。间接测距最有代表的是丹麦 Jens Busck 等人提出的时间切片法和 2007 年法德圣路易士研究院 Laurenzis 等人提出的距离映射选通法。在国内,2008 年浙江大学提出了与脉冲无关的基于双通道增益调制测距原理。本文使用 TDI CCD 作为光脉冲探测器进行研究。

1 双通道增益调制测距原理

双通道增益调制测距原理,即把回波信号分为均等的两份,分别通过增益系数不等的像增强器。见图 1。

设通道 1 和通道 2 的增益函数分别为^[4]:

$$y_1(t) = G_1 \text{Rect} \left[\left(t - \frac{2z_0}{c} \right) / T \right] \quad (1)$$

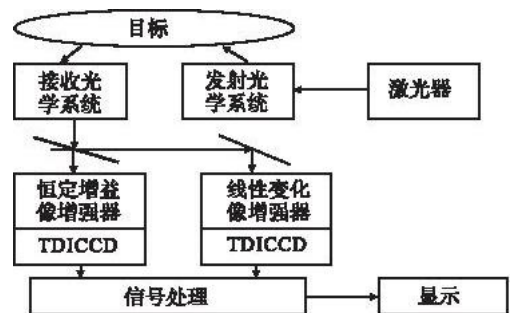


图 1 双通道增益调制测距原理图

Fig. 1 The diagram of dual-channel gain modulation ranging principle

* 收稿日期:2010-11-29

基金项目:国家部委基金资助项目(G020104PJ09DZ0246)

作者简介:郑秋贞(1985-),女,湖南邵阳人,硕士生,主要从事光通信、激光雷达三维成像系统研究。

E-mail:zhengqiuzhen@163.com

$$y_2(t) = \left[G_2 + k \left(t - \frac{2z_0}{c} \right) \right] \text{Rect} \left[\left(t - \frac{2z_0}{c} \right) / T \right] \quad (2)$$

式中: $k = (G_2' - G_2) / T$, T 为曝光时间, G_1 是通道 1 的增益, G_2 、 G_2' 分别是通道 2 的初始增益和结束增益; c 为光速。

使用门选通方式能有效抑制背向散射和背景光, 因此单位像素的回波能量可以写为:

$$E = \frac{\gamma}{z} \exp \left(\int \delta(z) dz \right) \int y \left(t + \frac{2z}{c} \right) p(t) dt \quad (3)$$

分别把式(1)和式(2)代入式(3)可得:

$$E_1 = \frac{\gamma}{z} \exp \left(\int \delta(z) dz \right) \int y_1 \left(t + \frac{2z}{c} \right) p_1(t) dt \quad (4)$$

$$E_2 = \frac{\gamma}{z} \exp \left(\int \delta(z) dz \right) \int y_2 \left(t + \frac{2z}{c} \right) p_2(t) dt \quad (5)$$

由式(5)比式(4)可得到测距公式:

$$z = z_0 + \alpha \left(\frac{E_2}{E_1} - \beta \right) \quad (6)$$

$$\text{式中: } \alpha = \frac{c \int p_1 \left(t + \frac{2z}{c} \right) dt}{2k \int p_2 \left(t + \frac{2z}{c} \right) dt}; \beta = \frac{G_2 \int p_2 \left(t + \frac{2z}{c} \right) dt + k \int t p_2 \left(t + \frac{2z}{c} \right) dt}{G_1 \int p_1 \left(t + \frac{2z}{c} \right) dt}.$$

2 距离精度分析

根据式(6)可知在已知 α 和 β 的情况下, 通过测量通道 2 和通道 1 的光强之比就可以求出距离 z , 测量距离的精度依赖于两通道接收到的光子数。在不考虑增加光源功率、增大接收口径以及使用效率较高的探测器的情况下, 提高测距精度的一种有效方法就是延长探测器的积分时间。光源连续发出光脉冲, 每个脉冲经过增益调制后成像在探测器上, 探测器通过积累光脉冲能量来增加总光强提高测距精度。

设光电阴极的量子效率为 η , 像增强器的噪声因子为 ξ 。忽略其他噪声源, 则通过像增强器后, 两路 TDI CCD 的信噪比相等且为:

$$\text{SNR} = \frac{\bar{E}}{\Delta E} = \sqrt{\frac{\eta NM}{2\xi}} \quad (7)$$

式中: $N/2$ 为单位像素接收到的光子数; M 为 TDI CCD 的级数; \bar{E} 为单位像素测量光强的均值; ΔE 为测量光强的标准偏差。

由误差传递公式:

$$\Delta z^2 = \left(\frac{\partial z}{\partial E_1} \right)^2 \Delta E_1^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial E_2} \right)^2 \Delta E_2^2 \quad (8)$$

将式(6)、式(7)代入式(8)计算得:

$$\Delta z = (z - z_0 + \alpha\beta) \sqrt{\frac{4\xi}{\eta NM}} = \frac{\Delta z_0}{\sqrt{M}} \quad (9)$$

式中 Δz_0 为使用 CCD 作为探测器时的测距误差。从上式可以看出测距精度提高到原来的 \sqrt{M} 倍, 并且 N 越大, 即积分时间越长, TDI CCD 的级数越大则测距精度越高。

3 像移补偿分析

机载激光雷达运动成像时由于延长积分时间使得目标和探测器之间存在相对移动产生像移, 使物体成像变得模糊。像移按产生的原因分为: ①飞行器前向飞行造成的前向像移; ②飞行器俯仰、偏航和滚动变化

造成的随机像移;③飞行器部件如螺旋桨和发动机组、相机平台和相机本身由于运动或冲击的震动变化带来的随机像移^[5]。由文献[6]可知飞行器前向运动产生的像移比其他的因素引起的像移大一个数量级。因此,一般情况下我们只考虑前向像移。

本文采用 TDI CCD 进行前向像移补偿。TDI CCD 的工作原理见图 2。在 t_1 时刻目标在第一级曝光,由于目标和 TDI CCD 存在相对运动,在 t_2 时刻目标将会成像在第二级感光介质上,与此同时,驱动电路驱动第一级曝光产生的信息使之运动到第二级的位置上,依此类推 M 级光信息就能叠加,这样使目标图像更加清晰。

为了使各级 TDI CCD 像元对目标精确的依次曝光,必须使目标图像在像平面上的像移动速度与电荷包移动的速度同步,才能使最终输出是对同一目标信号累加的结果^[7]。当电荷包移动的速度不等于目标图像在焦平面上的移动速度时,将会导致图像模糊。我们通常用像传递函数(MTF)来评价成像效果。

对于 M 级的 TDI CCD,设电荷转移一次的时间为 t ,相邻两级像元的中心距为 d ,目标在像平面上移动的平均速度为 v ,电荷包的平均速度为 v_e ,则转移一次的速度失配为: $\Delta v = |v_e - v|$,经过 M 次转移后像移量为:

$$S = M\Delta vt = \frac{\Delta vdM}{v_e} \quad (10)$$

把式(10)代入像移传递函数 MTF^[8]:

$$\text{MTF} = \sin c(fs) \quad (11)$$

式中: f 为图像的空间频率; s 为像移,可得:

$$\text{MTF} = \frac{\sin(\pi fdMJ)}{\pi fdMJ} \quad (12)$$

从图 3 可以看出随 TDI CCD 的级数增加以及速度失配绝对误差的增大 MTF 在一定范围内将急剧下降,因此,在具体情况下应该综合考虑 TDI CCD 级数的选取。

4 结束语

本文提出了使用 TDI CCD 结合双通道增益调制测距原理进行三维成像测距。该方法在提高测距精度的同时能有效补偿前向像移。由于 TDI CCD 的级数对 MTF 影响比较大,为了确保同时拥有较高的测距精度和精确的运动补偿可以通过比较选择适当的 M 值。

参考文献:

- [1] 赵远,许元男.增益调制非扫描激光雷达测距精度的理论分析[J].红外与激光工程,2009,38(2):313-317.
ZHAO Yuan, XU Yuannan. Theoretical analysis on range accuracy of gain-modulated scannerless lidar[J]. Infrared and laser engineering, 2009, 38(2):313-317. (in Chinese)
- [2] 姚金良.机载面阵三维激光雷达运动成像的特性研究[D].杭州:浙江大学,2010.
YAO Jinliang. Investigation on the characteristics of planar array three-dimensional airborne laser radar motion imaging[D]. Hangzhou: Zhejiang university, 2010. (in Chinese)
- [3] Zhang Yong, Zhao Yuan, Liu Liping, et al. A promoted lidar Imaging system based on gain modulation[C]//International symposium on photoelectronic detection and imaging 2009 laser sensing and imaging. Beijing: SPIE press, 2009:73822V-1-6.
- [4] ZHANG Xiuda, YAN Huimin. Pulse-shape-free method for long-range three-dimensional active imaging with high linear accuracy[J]. Optics letters, 2008, 33(11):1219-1221.

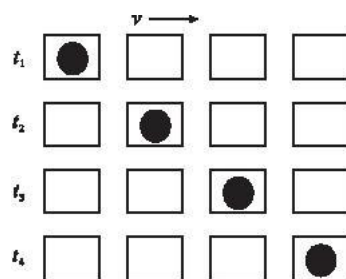


图 2 TDI CCD 工作原理
Fig. 2 The principle of TDI CCD

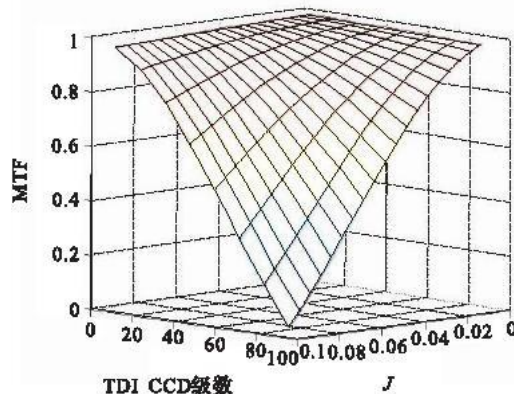


图 3 TDI CCD 级数和速度失配绝对误差对 MTF 的影响
Fig. 3 TDICCD series and velocity mismatch of the absolute error effect on the MTF

- [5] 彦昌翔,王家骐. 航空相机像移补偿计算的坐标变换方法[J]. 光学精密工程,2000,8(3):203-207.
YAN Changxiang, WANG Jiaqi. Method of coordination transfer ccd's[J]. Optics and precision engineering,2000,8(3):203-207. (in Chinese)
- [6] 刘明,刘钢. 航空相机的像移计算及补偿分析[J]. 光电工程,2004,31(增刊):12-14.
LIU Ming, LIU Gang. The effect of image motion on the quality of aerial camera images[J]. Opto-electronic engineering, 2004,31(S):12-14. (in Chinese)
- [7] 童子磊. CCD相机的像移补偿技术[J]. 激光与红外,2005,35(9):628-632.
TONG Zilei. Compensation technology for the image motion of CCD camera[J]. Laser & infrared,2005,35(9):628-632. (in Chinese)
- [8] Zhang L, Li Y X, Xu X W. Synchronous control analysis of TDI-CCD imaging system [C]//27th international congress on high-speed photography and photonics. Xi'an:SPIE press,2007:62795Q-1-6.
- [9] Peng L V, Yuanhe Tang, Kai Liu, et al. Study CCD image motion for remote sensing detection [C]//27th international congress on high-speed photography and photonics. Xi'an:SPIE press, 2007:62795S-1-7.
- [10] Busck J, Heiselberg H. Gated viewing and high accuracy three-dimensional laser radar [J]. Applied optics, 2004,43(24):4705-4710.

(编辑:田新华)

The Application of TDI CCD in Array Three dimensional Imaging Radar

ZHENG Qiu-zhen, YANG Hua-jun, LI Dong, ZHU Ying

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

Abstract: In order to improve the ranging accuracy of dual-channel gain modulation array three-dimensional imaging radar system, taking into account the compactness of the system structure and based on the working principle of TDI CCD which can make use of drive circuit to cumulative exposure information of multi-level of the same point, CCD replaced by TDI CCD as photo detector is presented. According to the ranging principle of this three-dimensional radar, ranging formula and ranging accuracy formula of imaging system are derived. The impact of the level of TDI CCD and the absolute error of velocity mismatch on range accuracy and the modulation transfer function (MTF) is studied. And the analyzing result shows that the accuracy of the distance can be improved to times of the original by this method, and the high precision motion compensation can be realized without additional motion compensation device.

Key words: TDI CCD; gain modulation; motion compensation; range