

距离选通技术在三维成像激光雷达中的应用研究

李 东, 杨华军, 郑秋贞, 邓志辉

(电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘 要: 距离选通技术在三维成像激光雷达中有着重要应用, 是一种解决水下微光成像和抑制后向散射问题的简单有效方法之一。文中概述了距离选通技术的原理和应用范围, 根据实时成像的需求, 提出了一种实时距离选通成像系统的设计方案, 该方案只需要一次成像就可以完成距离选通成像并求解出目标距离。根据质心法求解距离的原理, 详细推导了成像系统的距离像和距离精度, 并用仿真软件仿真分析了该系统距离像的距离精度和目标距离、时间切片数量、信噪比之间的关系。仿真结果表明: 距离精度受系统信噪比的影响很大, 当信噪比大于 2 000 时, 测距精度优于 0.2 m。

关键词: 距离选通; 实时成像; 三维激光雷达; 测距精度

中图分类号: TN958 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)01-0085-04

Application of range-gated technology in the three-dimensional imaging laser radar

Li Dong, Yang Huajun, Zheng Qiuzhen, Deng Zhihui

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

Abstract: Range-gated technology, which plays a very important role in the three-dimensional imaging laser radar, is one of simple and effective method to solve the underwater low light level imaging and inhibit backscattering. The principle and application areas of range-gating technology were outlined in this article. Then, according to the demand for real-time imaging, a real-time range-gated imaging system was presented. This system could complete range-gated imaging and solve the target distance just with an imaging picture. By use of the centroid method, the detail of detection range was derived from the imaging system, and the relations between range accuracy and target distance, slice number, signal to noise ratio(SNR) were analyzed. The results of simulation analysis show that the system distance accuracy is greatly influenced by the SNR of the imaging system, and it can achieve better than 0.2 m range accuracy with the SNR greater than 2 000.

Key words: range-gated; real-time imaging; three-dimensional laser radar; range accuracy

收稿日期: 2011-05-18; 修订日期: 2011-06-19

基金项目: 总装预研基金(G020104PJ09DZ0246)

作者简介: 李东(1986-), 男, 硕士生, 主要从事光通信、三维激光雷达的研究。Email: lidong09@gmail.com

导师简介: 杨华军(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光通信技术、计算机光学设计、光信息存储技术以及光子晶体理论与应用方面的研究。Email: yanghj@uestc.edu.cn

0 引言

三维激光雷达通过采集目标的位置、距离、强度等数据来获取目标表面三维坐标,实现三维图形的重建。在军事和民用上,三维激光雷达都有极其广泛的应用,如地形探测、森林植被覆盖状况探测、空气质量检测、目标识别与跟踪、水下目标和隐藏、伪装目标的探测等。三维激光雷达有多种成像方式,主要包括:雪崩二极管(APD)阵列成像,频率调制成像,距离选通成像等^[1-4]。

传统的无扫描激光成像雷达系统在遇到大雾、暴风、雨和雪等恶劣天气或者进行水下微光成像时,在激光的传播过程中,由于光路中的悬浮微粒等媒质对激光的散射,尤其是散射回探测器的回波,会导致图像的质量和清晰度大大下降。近十几年来,由于超高速激光器和延迟电路器、高灵敏光电探测器等器件制造的快速发展,使得在三维激光成像雷达中运用距离选通技术解决后向散射问题成为可能^[5-7]。笔者分析了距离选通成像的原理,提出了一种基于距离选通技术的实时三维成像激光雷达系统设计方案,并用仿真软件分析了系统的距离精度。

1 距离选通原理

距离选通的原理如图 1 所示。系统工作时由控制系统驱动激光器发出激光脉冲,同时产生一个延迟信号触发门选通装置。整个系统中,在激光脉冲的往返时间内,门处于关闭状态,门只在返回激光脉冲到达以及之后的一段时间处于开放状态,在门打开的这段时间,回波光强将在 CCD 上积累。在控制系统中完成的还有成像预处理、图像和数据的处理、目标距离像的获取以及目标三维模型的重建。

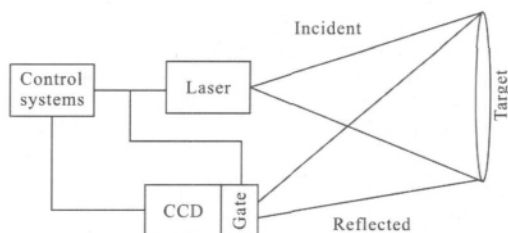


图 1 门选通原理图

Fig.1 Schematic diagram of range-gated

距离选通系统中,激光回波脉冲的功率方程可以写成如公式(1)所示的高斯形式^[7]:

$$P(t) = P_r \exp\left(-\left[\frac{(t-t_0)}{\sigma_{\text{pulse}}}\right]^2\right) \quad (1)$$

式式: t_0 为延迟时间,由目标的距离决定; σ_{pulse} 为激光光源的脉冲宽度; P_r 为回波信号最大功率,其值由公式(2)的激光雷达方程决定。

光波和微波都是电磁波,微波雷达的距离方程也可以应用到激光雷达中,激光雷达的距离方程可以从微波雷达的距离方程推导出来^[8]:

$$P_r = \frac{P_t \cdot \sigma \cdot D^2}{4\pi R^4 \theta_t^2} A_o \eta_{\text{Arm}} \eta_{\text{sys}} \quad (2)$$

式中: P_r 为探测器接收功率; A_o 为激光照射的目标面积; σ 为目标散射截面积; P_t 为激光发射功率; R 为探测距离; θ_t 为激光光束发散角; η_{Arm} 为单程大气传输系数; η_{sys} 为光学系统透过率; D 为接受孔径。

2 距离选通系统方案设计与分析

距离选通成像系统一般包括激光器及其驱动装置、选通门、同步选通控制器、图像和数据处理器、实时图像显示器,收发天线装置以及连接线路等器件构成。文中提出的距离选通实时成像系统框图如图 2 所示。

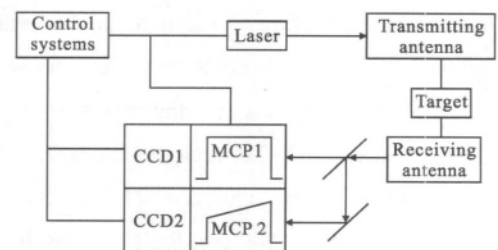


图 2 距离选通成像系统框图

Fig.2 Block diagram of range-gated imaging system

在图 2 的三维成像系统设计方案中,用 CCD 作成像装置,并在其前面加上选通型像增强器(MCP),像增强器应用既是作为选通控制门,也是为了放大激光回波信号,增加系统探测距离、提高信噪比。控制系统完成的功能是图像的采集、处理和显示的控制,以及激光脉冲发射触发信号和门选通触发信号的产生和控制。双通道比起单通道来成像速度更快,更适于实时成像。

激光器产生的脉冲序列经发射天线的准直和放大后,照射视场覆盖整个目标或需要观察目标的关键部位,目标反射回波经接收天线系统后由分束镜平均分成两束照射到两个像增强器上。其中一个像增强器在门选通时间内保持恒定增益,门关闭时间内增益为 0;另一个像增强器在门关闭时间内增益也为 0,门选通时间内也保持恒定增益,但其增益是随延迟时间线性变化的。该系统方案的测距原理与一般的距离选通测距的原理是一样的。

质心法求解距离选通测距结果为:^[3]

$$r = \frac{c}{2} \left(\sum_i I_i \right)^{-1} \sum_i I_i t_i \quad (3)$$

式中: $t_i = t_0 + i * T$

测距误差为^[7]:

$$\Delta r \cong \frac{c}{4} \cdot \frac{\sqrt{\sigma_{\text{pulse}}^2 + \sigma_{\text{gate}}^2}}{\text{SNR}} \quad (4)$$

式中: c 是激光在空气中的传播速度; I_i 表示成第 i 幅图像时,CCD 确定像素点探测到的强度; t_i 表示第 i 幅图像的延迟时间; t_0 是初始延迟时间; T 是延迟时间步长; N 表示完成一次测量所需要的图像数量。 T 和 N 的乘积决定了三维像的深度。

在理想的情况下,假设 MCP1 的增益为:

$$g_1(t) = k \text{Rect}[(t-t_0)/\sigma_{\text{gate}}] \quad (5)$$

假设 MCP2 的增益为:

$$g_2(t) = at \text{Rect}[(t-t_i)/\sigma_{\text{gate}}] \quad (6)$$

根据公式(1)、(5)和(6)可得,延迟时间为 t_i 时 CCD1 上的强度为:

$$I_{1i}(x,y) = \int g_1(t) \cdot p(t,x,y) dt = \int g_1(t) \cdot f(x,y) \cdot P_r \exp\left[-\left(\frac{(t-t_0)}{\sigma_{\text{pulse}}}\right)^2\right] dt \quad (7)$$

延迟时间为 t_i 时 CCD2 上的强度为:

$$I_{2i}(x,y) = \int g_2(t) \cdot p(t,x,y) dt = \int g_2(t) \cdot f_i(x,y) \cdot P_r \exp\left[-\left(\frac{(t-t_0)}{\sigma_{\text{pulse}}}\right)^2\right] dt \quad (8)$$

式中: x 和 y 为 CCD 上的像素点坐标; $p(t,x,y)$ 为对应像素点上光强的时间分布函数; $f_i(x,y)$ 为 CCD 面上的光强分布函数。

假设在一帧图像内,延迟时间序列 t_i 的长度为 N ,则一帧图像的强度为:

$$I_1(x,y) = \sum_{i=1}^N I_{1i}(x,y) \\ I_2(x,y) = \sum_{i=1}^N I_{2i}(x,y) \quad (9)$$

根据公式(3)~(9)可推导出距离像为:

$$r(x,y) = \frac{c}{2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N t_i I_{1i}(x,y)}{\sum_{i=1}^N I_{1i}(x,y)} = \frac{c}{2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N \int \frac{k}{a} \cdot g_2(t) \cdot f_i(x,y) \cdot P_r \exp\left[-\left(\frac{(t-t_0)}{\sigma_{\text{pulse}}}\right)^2\right] dt}{\sum_{i=1}^N \int g_1(t) \cdot f_i(x,y) \cdot P_r \exp\left[-\left(\frac{(t-t_0)}{\sigma_{\text{pulse}}}\right)^2\right] dt} \quad (10)$$

化简得:

$$r(x,y) = \frac{c}{2} \cdot \frac{k}{a} \cdot \frac{I_2(x,y)}{I_1(x,y)} \quad (11)$$

所以,该设计方案只用一次成像就可以得到目标的距离像。只要利用距离图 $r(x,y)$ 和强度图 $I_1(x,y)$ 就可以完成目标三维模型的重建工作。由于系统增加了一个分束镜,每一个 CCD 接收到的信号光功率只有反射回波功率的一半。相对于单通道距离选通的情况,其引入的噪声并没有下降一半,因此信噪比会下降 1~2 倍。该方法的测距精度肯定会有所降低,但其成像速度能够提高很多倍,这在要求实时成像的系统中是很有用的。

如果不考虑背景噪声和测量器件引入的噪声,选择器件参数为:激光脉冲宽 200 ps,门宽 400 ps,延迟时间步长 100 ps 的情况下^[7],仿真分析了测距精度和距离、时间切片数量之间关系。从图 3、图 4 可以得出结论:测距精度先随着时间切片数量的增加而增加,时间切片数量增加到一定值后,测距精度将保持不变;距离变化对测距精度的影响非常小,在 100~2000 m 的范围内,其变化值不超过 10^{-4} m。

整个系统的噪声可以近似为均值为 0 的高斯白噪声,因此系统的信噪比可以表示为:

$$\text{SNR} = \frac{P_s}{P_n} \quad (12)$$

式中: P_n 为平均高斯白噪声功率; P_s 为平均回波信

号功率。在时间切片数量为 25, 距离 300 m 的情况下, 仿真分析了信噪比和测距精度的关系。

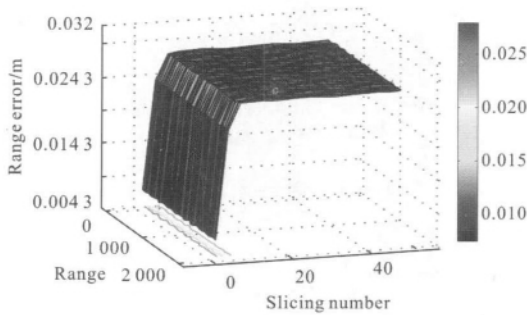


图 3 测距精度和距离、时间切片数量的关系

Fig.3 Relationship between range accuracy and target distance, the number of time slice

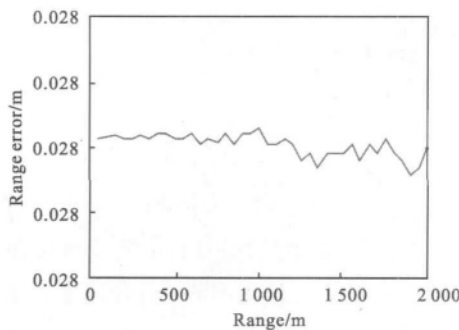


图 4 距离和测距精度的关系

Fig.4 Relationship between distance and range accuracy

从图 5 中可以得出结论:测距精度在总体上是

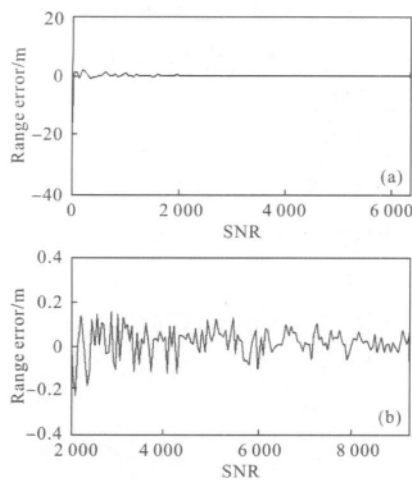


图 5 信噪比和测距精度的关系

Fig.5 Relationship between SNR and range accuracy

随信噪比的增大而提高的,但在一定的距离范围内还存在波动,当信噪比 $SNR > 2000$ 时,测距精度能达到 0.2 m 以上。

3 结论

文中提出并分析了一种基于距离选通技术的实时成像系统方案,该方案在激光雷达的探测距离内,测距精度不受距离远近的影响,信号信噪比和时间切片数量是决定距离精度的主要因素。缺点是要达到与传统单通道距离选通成像系统相同的测距精度,该方案对系统的信噪比要求很高。

参考文献:

- [1] Bai Lianfa, Zhang Yi, Chen Qian, et al. Some questions in the realization of range gated imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 57-61. (in Chinese)
柏连发, 张毅, 陈钱, 等. 距离选通成像实现过程中若干问题的探讨[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 57-61.
- [2] McLean J W. High-resolution 3D underwater imaging [C]// SPIE, 1999, 3761: 10-19.
- [3] Busck J, Heiselberg H. High accuracy 3D laser radar [C]// SPIE, 2004, 5412: 257-263.
- [4] Wang Shouzeng, Sun Feng, Zhang Xin. Development of laser illuminating range-gated imaging technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(s3): 95-99. (in Chinese)
王寿增, 孙峰, 张鑫. 激光照明距离选通成像技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(s3): 95-99.
- [5] Göhler B, Lutzmann P, Anstett G. 3D imaging with range gated laser systems using speckle reduction techniques to improve the depth accuracy [C]//SPIE, 2008, 7113.
- [6] Estrera J P, Saldana M R. Gated power supply technologies for advanced image intensifiers [C]//SPIE, 2003, 4796: 60-70.
- [7] Busck J, Heiselberg H. Gated viewing and high accuracy three-dimensional laser[J]. *Appl Opt*, 2004, 43: 4705-4710.
- [8] Xiao Ya. Research on detection system scheme of long range tracking laser radar [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
肖雅. 远程激光跟踪雷达激光探测系统方案研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.