

三维成像激光雷达线阵探测模式分析

孙志慧¹, 邓甲昊², 王 昌¹

(1. 山东省光纤传感技术重点实验室, 山东省科学院激光研究所, 山东 济南 250014;

2. 北京理工大学机电工程与控制国家级重点实验室, 北京 100081)

摘 要:以三维成像激光雷达对地面车辆目标探测为应用背景,采用线阵光电探测器并行接收的新体制来提高对目标成像的速度和实时性。按照对目标照射的激光辐射形式,总结出两种线阵探测模式:一种是激光多束发射模式,另一种是激光泛光发射模式。对这两种模式的机理、实现方式及优缺点进行了分析,并分别建立了两种模式下的激光雷达探测方程。采用信噪比和测距精度来分析两种模式的探测和测距性能。分别推导出了两种模式下信噪比与距离,发射功率与距离的关系表达式并进行了仿真。仿真结果表明,在相同距离和发射功率下,激光多束发射模式的回波信噪比更高;在相同距离和测距精度下,激光泛光发射模式需采用更高的发射功率。

关键词:激光雷达;探测模式;线阵探测;三维成像

中图分类号:TN958.98

文献标识码:A

Linear array detection mode of three-dimensional imaging laser radar

SUN Zhi-hui¹, DENG Jia-hao², WANG Chang¹

(1. Shandong Province Key Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology, Laser Institute of Shandong Academy of Sciences, Ji'nan 250014, China;

2. State Key Laboratory of Mechatronic Engineering and Control, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A new kind of three-dimensional imaging laser radar is used to detect vehicle targets on the ground. Parallel linear array photodiode receiver is adopted by the laser radar to increase imaging speed. Two linear array detection modes are summarized. Their difference is the laser irradiation modes on the target; one is multi-beam laser transmitting mode, the other is floodlight laser transmitting mode. Mechanisms, implementation methods, advantages and disadvantages of the two detection modes are analyzed, and laser radar detection equations of the two detection modes are established. Signal-to-noise ratio (SNR) and ranging accuracy are adopted to analyze the detection and ranging performance of the two modes. Expressions of SNR versus range, laser transmitting power versus range are deduced, and simulation is done. Simulation results show that, under the same condition of the range and laser transmitting power, SNR of multi-beam laser transmitting mode is higher; and under the same condition of the range and ranging accuracy, the transmitting power of floodlight laser transmitting mode is higher.

Key words: laser radar; detection mode; linear array detection; three-dimensional imaging

基金项目:国防科技重点实验室基金项目(No. 9140C3601130802); 预研支撑基金项目(No. 62301110404); 山东省科学院科技发展基金重点项目资助。

作者简介:孙志慧(1984-),男,博士,主要从事激光探测与成像及光纤传感方面的研究工作。E-mail:bitszh@yahoo.cn

收稿日期:2010-12-19

1 引言

三维成像激光雷达具有三维轮廓和外貌成像能力,可获取目标的多种图像,如距离像、强度像和距离-角度像等,具有高的距离和角度分辨率,图像特征稳定,抗干扰能力强,抗目标隐身能力强^[1-2]。三维成像激光雷达具有的独特特点,使其成为一种非常具有潜力的探测手段,适合于精确打击武器的避障、导航、制导和精确毁伤,目标的侦察、监视、分类和识别,航天器空间交会对接、着陆落点选择,对地遥感观测、地形测绘、灾害调查和植被测量,无人车和机器人的避障、导航,直升机、船舶和汽车的主动防撞,以及工业自动装配和加工等,在军民两大领域均具有广阔的发展前景和应用需求。

三维成像激光雷达技术按扫描方式可分为单元探测器二维扫描、面阵探测器非扫描凝视和线阵探测器一维扫描^[3]。单元探测器二维扫描激光成像雷达采用单元探测器接收,每次只能获得一个像素的距离和回波强度数据,通过二维光机扫描或一维光机扫描加推扫实现所有像素数据的采集,最终得到目标的距离像和强度像;目前,该成像探测技术已较为成熟,但存在着成像速率低、体积功耗大的缺点。面阵探测器非扫描凝视激光成像雷达采用面阵探测器接收,无需扫描机构,可同时得到所有像素的距离和强度数据;该成像探测技术具有成像速率高、结构紧凑、体积小的优点,但受面阵探测器阵元大小及读出处理电路的限制,难以获得高分辨率或大视场的图像,且由于面阵探测器制造工艺水平限制,成品率较低,使得基于该成像探测技术的激光雷达成本较高。线阵探测器一维扫描激光成像雷达采用线阵探测器接收,每次可获得一行(列)像素的距离和回波强度数据,通过推扫或一维光机扫描实现所有像素数据的采集,最终获得距离像和强度像;该成像探测技术介于前两者之间,较适合于运动平台和较大视场探测,其成像速率远高于单元探测器二维扫描成像技术,且由于线阵探测器产品较丰富、阵元数目多,能获得较高分辨率图像,是一种颇具优势和潜能的成像探测技术^[4]。

本文以一种新型巡飞器对地面车辆目标探测为应用背景,采用线阵探测器一维扫描三维成像激光雷达,通过线阵光电探测器的并行接收和飞行推扫,来提高对目标成像的速度和实时性。针对基于线阵光电探测器的三维成像激光雷达探测新体制,按照对目标照射的激光辐射形式,总结出两种线阵探测模式:一种是激光多束发射模式,另一种是激光泛光发射模式,分别对这两种模式进行了分析,建立了探测方程,并对探测性能进行了仿真。

2 激光多束发射模式及其探测方程

激光多束发射模式采用与线阵光电探测器图样相匹配、一一对应的多束激光对目标进行照射,且采用可提前获取目标信息的前倾探测方式,如图1所示。

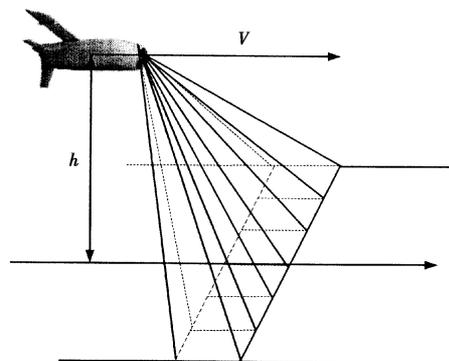


图1 激光多束发射模式

激光多束发射可采用激光器阵列发射或对一个激光器输出的光并行分束发射。激光器阵列发射可采用多个激光器,通过光纤阵列将其排布成所需的图案,或采用半导体激光二极管阵列,如德国OSRAM公司的12元脉冲半导体激光二极管阵列产品,但激光器阵列发射的方法不易做到激光的同步输出,使各通道的距离测量存在偏差^[5]。对一个激光器输出的光并行分束发射,主要采用并行分束发射装置将激光分束成所需要的图案。目前,常用的并行分束发射装置主要有衍射透镜光栅、光纤阵列、反射镜组、棱镜等,激光并行分束发射可做到同时出光,但并行分束发射装置的设计较复杂。

采用激光多束发射,可以使激光的能量得到更好的利用,因而可增大三维成像激光雷达的探测距离。但在实际应用中,若所需激光束数目的很多,实现起来较困难;此外,线阵光电探测器各像元所接收到的回波与对应发射光束一一对应关系难以保证,且可能存在回波信号间的相互叠加与串扰。这是该模式设计时所必须考虑的一个问题。

激光雷达探测方程是进行系统总体设计和性能评估的基础,其反映了各种因素对系统探测性能的影响。在激光多束发射模式下,假设目标为朗伯漫反射体,以一组发射和接收单元为例,来建立其探测方程。就本文应用而言,由于系统所需探测的距离较近(一般小于100 m),发射单元激光发散角较小(一般小于1°),则垂直于光束的目标截面始终大于等于目标处的光束截面,所探测目标为扩展目标。根据这些特征建立的探测方程为:

$$P_r = P_t \cdot \tau_t \cdot \tau_a \cdot \rho \cdot \cos \gamma \cdot \frac{1}{\pi R^2} \cdot \tau_a \cdot A_r \cdot \tau_r$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{P_r \tau_i \tau_r \tau_a^2 \rho A_r \cos \gamma}{\pi R^2} \\
 &= \frac{P_{s1} \tau_i \tau_r \exp(-2\sigma R) \rho D^2 \cos \gamma}{4mR^2} \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中, P_r 为一个接收单元的回波功率; P_i 为一个发射单元的峰值功率, $P_i = P_{s1}/m$, 其中 P_{s1} 为激光总的峰值发射功率; m 为发射单元阵列或激光分束数目, 其值和线阵光电探测器元数相等; τ_i, τ_r 分别为发射和接收光学系统效率; ρ 为目标反射率; γ 为探测方向与朗伯表面法线夹角; A_r 为接收光学系统有效通光面积, $A_r = \pi D^2/4$, D 为接收光学系统有效通光直径; R 为探测距离; τ_a 为单程大气透射率, $\tau_a = \exp(-\sigma R)$, σ 为大气消光系数, 可表示为:

$$\sigma = \frac{3.91}{R_v} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^{-q} \quad (2)$$

式中, λ 为激光波长, μm ; R_v 为能见度, km ; q 为波长修正因子, 是与波长有关的常数, 对于 $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$ 的近红外波段激光, 其取值为^[6]:

$$q = \begin{cases} 1.6 & R_v > 50 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \text{ km} < R_v < 50 \text{ km} \\ 0.16 R_v + 0.34 & 1 \text{ km} < R_v < 6 \text{ km} \\ R_v - 0.5 & 0.5 \text{ km} < R_v < 1 \text{ km} \\ 0 & R_v < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (3)$$

3 激光泛光发射模式及其探测方程

激光泛光发射模式采用长扁椭圆或长条矩形的光束对目标进行泛光照射, 线阵光电探测器各像元接收各自视场内的回波信号, 采用可提前获取目标信息的前倾探测方式, 如图 2 所示。

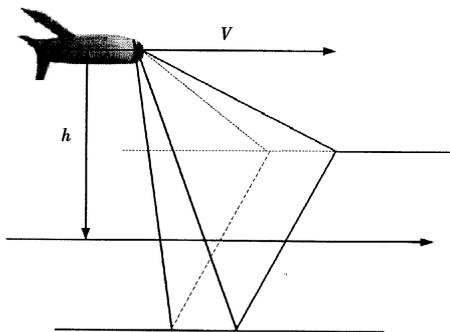


图2 激光泛光发射模式

激光泛光发射模式所需形状的光斑一般可采用透镜系统来获得。如要获得长条矩形光斑, 可采用两个相互正交且放大率不同的柱面透镜系统, 使激光束在两个不同的方向上具有不同的发散角, 以形成长条矩形光斑^[7]。对于半导体激光器, 由于其 p-n 结面积很大, 所发射激光的发散角相当大, 且在两个正交方向光束的发散角不同(如 $15^\circ \times 30^\circ$), 需采用柱面透镜系统。柱面透镜系统一般包括垂直

柱面透镜和水平柱面透镜, 其中垂直柱面透镜的作用是将光束在水平方向整形, 形成水平方向所要求的光束截面和发散角; 水平柱面透镜的作用是将光束在垂直方向整形, 形成垂直方向所要求的光束截面和发散角。

在激光泛光发射模式下, 由于线阵光电探测器像元之间存在着间隙, 其激光能量利用效率不如激光多束发射模式, 在相同探测距离情况下, 所需发射激光的峰值功率高, 但其实现较容易, 且通过线阵光电探测器各像元的各自视场接收回波信号, 避免了激光多束发射模式所需的一一对应关系及可能存在的信号叠加与串扰。

在激光泛光发射模式下, 假设目标为朗伯漫反射体, 以一个接收单元为例, 建立其探测方程。由于采用激光泛光照射方式, 激光光束在目标上的覆盖区域一般为长条矩形或长扁椭圆形, 即只能覆盖目标某一维方向上的全部(如宽度), 但不能覆盖目标另一维方向上的全部(如长度)。根据这些特征建立的探测方程为:

$$\begin{aligned}
 P_r &= P_{s2} \cdot \tau_i \cdot \tau_a \cdot \frac{w}{R\Omega} \cdot \rho \cdot \cos \gamma \cdot \frac{1}{\pi R^2} \cdot \tau_a \cdot A_r \cdot \tau_r \cdot \frac{1}{m} \\
 &= \frac{P_{s2} \tau_i \tau_r \tau_a^2 w \rho A_r \cos \gamma}{m \pi R^3 \Omega} \\
 &= \frac{P_{s2} \tau_i \tau_r \exp(-2\sigma R) w \rho D^2 \cos \gamma}{4mR^3 \Omega} \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中, P_{s2} 为激光总的峰值发射功率; w 为目标宽度; Ω 为发射光束长径方向的发散角, 其他参数同式(1)。

4 三维成像激光雷达线阵探测性能仿真

对于采用线阵光电探测器的三维成像激光雷达, 可用信噪比、测距精度等参数来分析其探测和测距性能。下面对比分析了三维成像激光雷达线阵探测的两种模式即激光多束发射模式和激光泛光发射模式的探测性能。

信噪比是与系统探测和测距能力密切相关的重要参数, 一般采用功率信噪比来进行分析。功率信噪比的表达式为:

$$\text{SNR} = \left(\frac{P_r}{\text{NEP}} \right)^2 \quad (5)$$

式中, NEP 为噪声等效功率。

由式(1)、式(5)则可得到激光多束发射模式下的功率信噪比表达式为:

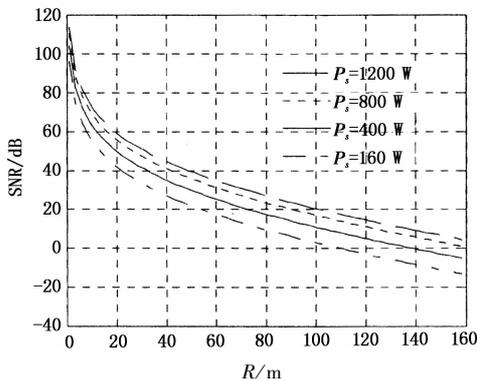
$$\text{SNR}_1 = \left(\frac{P_{s1}}{m \text{NEP}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\tau_i \tau_r \exp(-2\sigma R) \rho D^2 \cos \gamma}{4R^2} \right)^2 \quad (6)$$

由式(4)、式(5)则可得到激光泛光发射模式下

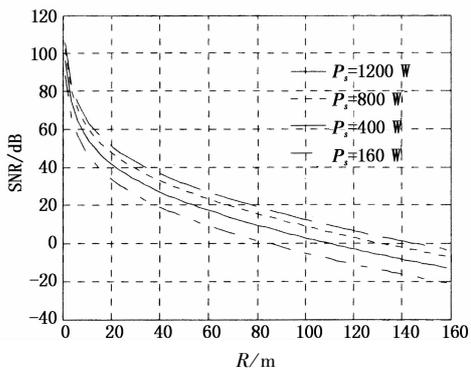
的功率信噪比表达式为:

$$SNR_2 = \left(\frac{P_{s2}}{mNEP} \right)^2 \cdot \left(\frac{\tau_i \tau_r \exp(-2\sigma R) \omega \rho D^2 \cos \gamma}{4R^3 \Omega} \right)^2 \quad (7)$$

为揭示信噪比的变化规律,进行了仿真分析。选择如下参数: $NEP = 10^{-8} \text{ W}$, $\tau_i = \tau_r = 0.6$, $\lambda = 0.9 \text{ }\mu\text{m}$, $R_v = 0.5 \text{ km}$, $\rho = 0.65$, $D = 40 \text{ mm}$, $\gamma = 45^\circ$, $w = 4 \text{ m}$, $m = 16$, $R\Omega = 10 \text{ m}$ ($R\Omega$ 为光斑长径上的尺寸), 可得出在不同峰值发射总功率(1200 W, 800 W, 400 W, 160 W), 两种模式下功率信噪比 SNR 与距离 R 的关系曲线, 分别如图 3(a)、图 3(b) 所示。由图可知, 在相同峰值发射功率和相同距离处, 激光多束发射模式下的回波信噪比高于激光泛光发射模式下的回波信噪比。



(a) 激光多束发射模式信噪比与距离关系



(b) 激光泛光发射模式信噪比与距离关系

图3 两种模式下信噪比与距离关系

测距精度表征的是测距值重复性的一个统计量, 是反映三维成像激光雷达系统测距精准性的重要参数, 对于采用脉冲测距的三维成像激光雷达, 其测距精度 σ_R 可表示为:

$$\sigma_R = \frac{c}{2B\sqrt{SNR}} \quad (8)$$

式中, c 为光速; SNR 为脉冲回波信号的功率信噪比; B 为脉冲回波信号带宽。

由式(6)、式(8)可得到激光多束发射模式下的

测距精度 σ_{R1} 的表达式:

$$\sigma_{R1} = \frac{2mcR^2 NEP}{BP_{s1} \tau_i \tau_r \exp(-2\sigma R) \rho D^2 \cos \gamma} \quad (9)$$

由式(7)、式(8)可得到激光泛光发射模式下的测距精度 σ_{R2} 的表达式:

$$\sigma_{R2} = \frac{2mcR^3 \Omega NEP}{BP_{s2} \tau_i \tau_r \exp(-2\sigma R) \omega \rho D^2 \cos \gamma} \quad (10)$$

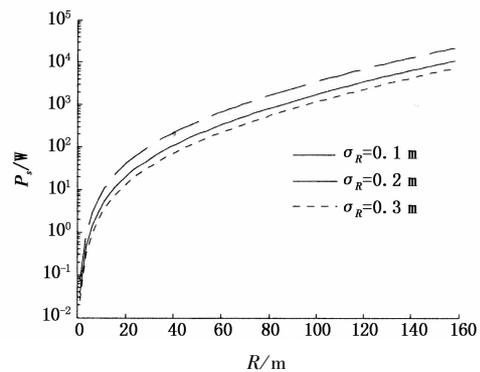
式(9)和式(10)可变换为:

$$P_{s1} = \frac{2mcR^2 NEP}{B\sigma_{R1} \tau_i \tau_r \exp(-2\sigma R) \rho D^2 \cos \gamma} \quad (11)$$

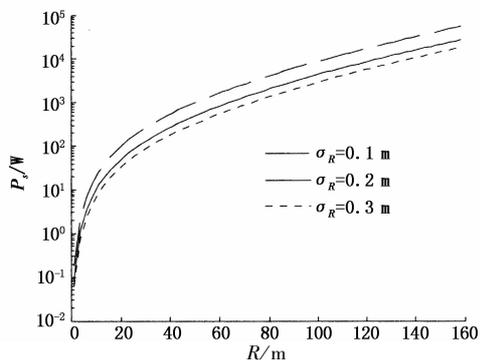
$$P_{s2} = \frac{2mcR^3 \Omega NEP}{B\sigma_{R2} \tau_i \tau_r \exp(-2\sigma R) \omega \rho D^2 \cos \gamma} \quad (12)$$

由式(11)、式(12), 可分析在特定的测距精度下, 激光发射总功率与探测距离的关系。

在选择如下参数: $m = 16$, $NEP = 10^{-8} \text{ W}$, $B = 50 \text{ MHz}$, $\tau_i = \tau_r = 0.6$, $\lambda = 0.9 \text{ }\mu\text{m}$, $R_v = 0.5 \text{ km}$, $\rho = 0.65$, $D = 40 \text{ mm}$, $\gamma = 45^\circ$, $w = 4 \text{ m}$, $R\Omega = 10 \text{ m}$, 在测距精度分别为 0.1 m, 0.2 m 和 0.3 m 时, 由式(11)、式(12)可得出两种模式下, 激光发射总功率 P_s 与距离 R 的关系曲线, 如图 4 所示。由图可知, 在相同距离处, 获得较高的测距精度需采用较高的发射功率; 在相同距离、相同测距精度下, 激光泛光发射模式比激光多束发射模式需采用更高的发射功率。



(a) 激光多束发射模式发射功率与距离关系



(b) 激光泛光发射模式发射功率与距离关系

图4 两种模式下发射功率与距离关系

5 结 论

针对三维成像激光雷达线阵探测新体制,总结出两种线阵探测模式:①激光多束发射模式;②激光泛光发射模式。对这两种模式的机理、实现方式及优缺点进行了分析,并分别建立了两种模式下的激光雷达探测方程。采用信噪比和测距精度来分析两种模式的探测和测距性能,推导出了两种探测模式下信噪比与距离,发射功率与距离的关系表达式并进行了仿真。本文研究将为基于线阵探测体制的三维成像激光雷达系统设计和性能评估提供一定的理论依据。

参考文献:

- [1] Han S K. Trend of laser imaging lidar technique[J]. Optical Technique, 2006, 32(S): 494 - 496. (in Chinese)
韩绍坤. 激光成像雷达技术及发展趋势[J]. 光学技术, 2006, 32(增刊): 494 - 496.
- [2] Sun Z H, Deng J H, Yan X W. Progress and current state of the development of laser imaging detection system and its key techniques [J]. Science & Technology Review, 2008, 26(3): 74 - 79. (in Chinese)
孙志慧, 邓甲昊, 闫小伟. 国外激光成像探测系统的发
- 展现状及其关键技术[J]. 科技导报, 2008, 26(3): 74 - 79.
- [3] Steinvall O, Carlsson T, Grönwall C. Laser Based 3-D imaging: new capabilities for optical sensing [R]. FOI-R - 0856 - SE, 2003, ISSN1650 - 1942.
- [4] Sun Z H. Key technology research of linear array push-broom laser imaging detection and recognition [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
孙志慧. 线阵推扫式激光成像探测与识别关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2009.
- [5] Li F, Wu S Y, Yang H G. Multi-element array detecting technology of lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(2): 295 - 297. (in Chinese)
李番, 邬双阳, 杨红果. 激光雷达多元阵列探测技术 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 295 - 297.
- [6] Kim I I, McArthur B, Korevaar E. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications [C]. Proceedings of SPIE, 2001, 4214: 26 - 37.
- [7] Xiong H F. Laser radar [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1994. (in Chinese)
熊辉丰. 激光雷达 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 1994.