

引用格式:王朝晖,徐国栋,仇振安,等.相干激光雷达漫反射目标探测参数仿真分析研究[J].电光与控制,2021,28(5):66-69. WANG Z H, XU G D, QIU Z A, et al. Parameters of diffuse-reflection target detection of coherent lidar: simulation analysis and study[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(5): 66-69.

## 相干激光雷达漫反射目标探测参数仿真分析研究

王朝晖<sup>1</sup>, 徐国栋<sup>2</sup>, 仇振安<sup>3</sup>, 郝培育<sup>1</sup>, 蔡猛<sup>1</sup>, 井晨睿<sup>4</sup>

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000; 2. 陆装航空军代局, 北京 100000;  
3. 陆装驻洛阳地区航空军代室, 河南 洛阳 471000; 4. 洛阳师范学院物理与电子信息学院, 河南 洛阳 471934)

**摘要:** 依据漫反射目标探测的信号与噪声的统计特征,对相干激光雷达的探测信噪比、接收灵敏度等关键参数进行仿真分析与研究。结果表明,接收灵敏度与探测概率和虚警率性能要求密切相关,同时也会受到目标速度动态范围以及所选取的波长的影响,采用多次探测的方式对接收灵敏度有明显的提升作用。研究结果对相干激光雷达的总体设计具有重要意义。

**关键词:** 相干激光雷达; 漫反射目标; 接收灵敏度

中图分类号: TN958.98 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2021.05.015

## Parameters of Diffuse-Reflection Target Detection of Coherent Lidar: Simulation Analysis and Study

WANG Zhaohui<sup>1</sup>, XU Guodong<sup>2</sup>, QIU Zhen'an<sup>3</sup>, HAO Peiyu<sup>1</sup>, CAI Meng<sup>1</sup>, JING Chenrui<sup>4</sup>

(1. Luoyang Institute of Electro-Optic Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China; 2. Aviation Military Representative Bureau of Army Armament Department, Beijing 100000, China; 3. Aviation Military Representative Office of Army Armament Department in Luoyang, Luoyang 471000, China; 4. College of Physical & Electronic Information, Luoyang Normal University, Luoyang 471934, China)

**Abstract:** According to the statistical characteristics of signal and noise of diffuse-reflection target detection, analysis is made to the key parameters such as signal to noise ratio and receiving sensitivity of the coherent lidar. The research results show that: 1) The receiving sensitivity is closely related to the requirement of false alarm rate and detection probability, as well as the dynamic range of target velocity and the detection wavelength; and 2) The sensitivity can be significantly improved by the mode of multiple detections. The research result is of great significance for the system design of coherent lidars.

**Key words:** coherent lidar; diffuse-reflection target; receiving sensitivity

### 0 引言

相干激光雷达是一种基于光学混频原理的激光探测系统,高探测灵敏度是相干激光雷达相对于直接探测激光雷达的重要优势之一<sup>[1-3]</sup>。根据经典的相干探测理论,当本振光足够强且信号光场与本振光场满足波前匹配条件,同时,接收端的滤波带宽可以达到傅里叶变换极限时,其探测灵敏度可以达到单光子量级<sup>[4]</sup>。因此在理想条件下,相干激光雷达相对于直接探测激

光雷达可获取更远的探测距离<sup>[5-6]</sup>。然而,对于常见的非合作漫反射目标,目标表面的粗糙度通常会超过探测激光的波长,经过目标散射的回波光在接收天线处的光强分布会产生强烈的涨落,即激光散斑效应<sup>[7]</sup>。激光散斑效应造成探测器的输出光电流具有圆形复高斯随机过程的特征,会在一定程度上影响探测性能<sup>[8-10]</sup>。此时,经典的相干探测理论无法对相干激光雷达的性能做出准确的评估。

本文从相干激光雷达漫反射目标探测的噪声和信号统计特征出发,对探测信噪比进行分析,以此为基础,结合相干激光雷达的具体指标要求对不同条件下的探测灵敏度进行计算,最后就多脉冲探测对于灵敏度的提升作用进行评估。本文的研究结果可直接用于相干激光雷达漫反射目标的测程估算,对相干激光雷

收稿日期:2020-04-16 修回日期:2021-04-11

基金项目:国家自然科学基金(11704174)

作者简介:王朝晖(1989—),男,河南洛阳人,博士,工程师,研究方向为机载激光探测系统总体设计。

达系统的总体设计具有重要意义。

## 1 信噪比分析

对于相干探测,当本振光足够强时,引入的散粒噪声为主要的噪声源,其噪声电流的概率密度函数满足瑞利分布,可表示为

$$p_N(i_N) = \frac{i_N}{\sigma_N^2} \exp\left(-\frac{i_N^2}{2\sigma_N^2}\right) \quad (1)$$

式中: $i_N$ 为探测器输出的噪声电流; $\sigma_N^2$ 为噪声相幅矢量的方差,即<sup>[4]</sup>

$$\sigma_N^2 = \frac{\eta_Q e^2}{h\nu_0} P_L B \quad (2)$$

式中: $\eta_Q$ 为探测器的量子效率; $e$ 为电子电荷; $h$ 为普朗克常量; $\nu_0$ 为本振光的中心频率; $P_L$ 为本振光功率; $B$ 为接收系统的带宽。

系统的虚警率 $P_f$ 与探测阈值 $i_T$ 之间满足

$$P_f = \int_{i_T}^{\infty} \frac{i_N}{\sigma_N^2} \exp\left(-\frac{i_N^2}{2\sigma_N^2}\right) di_N = \exp\left(-\frac{i_T^2}{2\sigma_N^2}\right) \quad (3)$$

对于非合作漫反射目标,假设目标表面的粗糙度大于一个波长,且表面高度起伏的自相关函数为关于空间位置的冲激函数。此时,经目标散射传输至接收天线处的散斑光场具有圆形复高斯随机过程的特征,其振幅满足瑞利概率分布函数。探测器输出的有效电流幅值与回波散斑场在天线口径上的积分成正比,同样满足瑞利分布。因此,当信号和噪声同时存在时,输出光电流的概率密度函数满足<sup>[8]</sup>

$$p_S(i_S) = \frac{i_S}{\sigma_N^2 + \sigma_S^2} \exp\left(-\frac{i_S^2}{2(\sigma_N^2 + \sigma_S^2)}\right) \quad (4)$$

式中: $i_S$ 为信号与噪声同时存在时探测器输出的光电流; $\sigma_S^2$ 为信号光电流相幅矢量的方差,即

$$\sigma_S^2 = \left(\frac{\eta_Q e}{h\nu_0}\right)^2 P_L \bar{I}_s A_{\text{eff}} = \left(\frac{\eta_Q e}{h\nu_0}\right)^2 P_L \bar{P}_s \quad (5)$$

式中: $\bar{I}_s$ 为散斑场的平均光强; $A_{\text{eff}}$ 为天线的有效接收面积; $\bar{P}_s$ 为有效转化为中频信号的回波光功率的期望值。探测概率 $P_d$ 仍可由瑞利概率密度分布的积分得到,其结果为

$$P_d = \exp\left(-\frac{i_T^2}{2(\sigma_N^2 + \sigma_S^2)}\right) \quad (6)$$

联合式(3)和式(6)得到,在一定的探测概率和虚警率要求的情况下,系统的最小信噪比(SNR)应满足

$$R_{s,N} = \frac{\bar{I}_s^2}{i_N^2} = \frac{\sigma_S^2}{\sigma_N^2} \geq \frac{\ln P_f}{\ln P_d} - 1 \quad (7)$$

图1所示为不同条件下探测器输出电流的概率密度函数 $p(i)$ ,其中, $i/\sigma_N$ 表示输出电流与探测器噪声电流的方差之比。图1(a)所示为SNR为0即仅有噪

声存在时的电流概率密度函数,其中,电流的检出阈值 $i_T$ 确定为 $2.8\sigma_N$ ,对噪声的概率密度函数超过 $i_T$ 的部分进行积分即可得到虚警率为1.98%,如图中的灰色阴影部分所示。容易看出,检出阈值设定的越高,虚警率越低,因此检出阈值应由系统的虚警率要求确定。图1(b)~图1(d)所示为SNR分别为1,5,10时探测器输出电流的概率密度函数,对其超过 $i_T$ 的部分积分即可得到探测概率分别为14%,52%和70%,如图中绿色阴影部分所示。因此,在噪声和检出阈值相同的情况下,回波功率越高,信噪比越高,探测概率越大。综上,在系统噪声的统计特性确定的情况下,相干激光雷达对虚警率和探测概率要求越高,所需的探测信噪比越高,对最小接收功率即探测灵敏度的要求也越高。以下对接收灵敏度的影响因素进行分析。

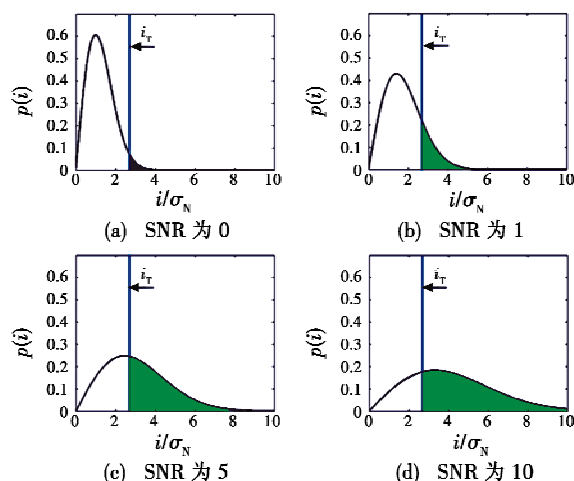


图1 不同信噪比条件下探测器输出电流的概率密度函数  
Fig. 1 Probability density function of the output current under different signal to noise ratio

## 2 接收灵敏度分析

在相干激光雷达对漫反射目标探测时,可将所需的接收光功率期望值定义为探测灵敏度。联合式(2)和式(5),得出天线接收的回波光功率期望值 $\bar{P}_s$ 与探测信噪比之间的关系为

$$R_{s,N} = \frac{\eta_Q \bar{P}_s}{h\nu_0 B} \quad (8)$$

式中,接收带宽 $B$ 由目标速度的动态范围决定,即

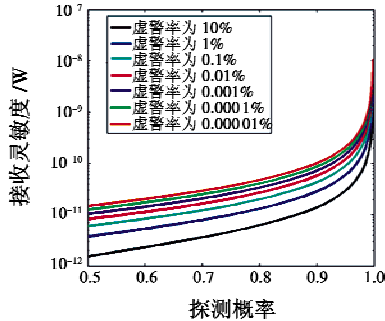
$$B = \frac{2v}{\lambda_0} \quad (9)$$

式中: $v$ 为目标速度的动态范围; $\lambda_0$ 为回波中心波长。将式(8)、式(9)代入式(7),得出探测灵敏度为

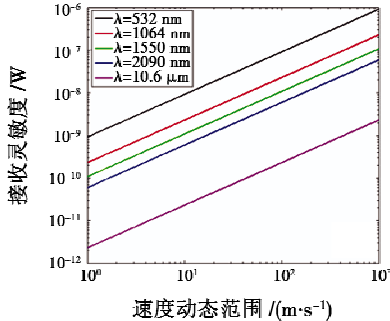
$$\bar{P}_s = \frac{2hcv}{\eta_Q \lambda_0^2} \left( \frac{\ln P_f}{\ln P_d} - 1 \right) \quad (10)$$

图2所示为式(10)中的不同因素对接收灵敏度的

影响。当目标具有完全确定的速度时,接收带宽可以取到傅里叶变换极限,即满足  $B = 1/\tau$ ,  $\tau$  为脉冲宽度,此时,探测灵敏度与虚警率和探测概率的关系如图 2(a) 所示。



(a) 虚警率和探测概率指标要求的影响



(b) 目标速度动态范围和探测波长的影响

图 2 探测灵敏度的影响因素仿真结果

Fig. 2 Simulation results of influence factors of detection sensitivity

脉冲宽度取 400 ns, 探测器量子效率取 0.7, 波长取 1064 nm, 可以看出接收灵敏度与虚警率和探测概率紧密相关。系统对虚警率和探测概率的要求越高, 探测灵敏度就越差。因此针对实际的应用场景, 如果相干激光雷达对漫反射目标进行探测, 同时对虚警率和探测概率有较高的要求, 即使滤波带宽达到了傅里叶变换极限, 探测灵敏度也很难达到单光子量级。图 2(b) 所示为目标速度的动态范围以及所选取的激光波长对灵敏度的影响, 将探测概率和虚警率分别固定为 99% 和 1%, 可以看出, 当目标速度动态范围增加时, 探测灵敏度随之线性下降。与此同时, 当选取的激光波长增加时, 由于光子能量和目标的多普勒频移同时减小, 探测灵敏度会得到提升。因此在相同的条件下选取较长的探测波长, 同时尽可能精确地获取目标的速度, 有利于获取较高的探测灵敏度。

### 3 多次探测对接收灵敏度的提升作用分析

在相干激光雷达对漫反射目标进行探测时, 目标的移动、目标表面的振动以及大气的扰动等效效应均会造成接收天线处的回波散斑场处于动态变化之中。如

果对目标进行多次探测时, 散斑场的相位扰动超过一个波长, 即可假设每次探测所接收的散斑场相互独立。多次探测有利于提高探测概率, 从而提升探测灵敏度。假设单次探测的探测概率为  $P_d$ , 当探测次数为  $N$  时, 在  $N$  次相互独立的探测中至少有一次检出的概率为最终的探测概率, 可以表示为

$$P_{Nd} = 1 - (1 - P_d)^N \quad (11)$$

另一方面, 当单次探测的虚警率为  $P_f$ ,  $N$  次相互独立的探测均无虚警发生的概率为最终的虚警率, 可以表示为

$$P_{Nf} = 1 - (1 - P_f)^N \quad (12)$$

将式(11)和式(12)代入式(10), 得出在多次探测的情况下探测灵敏度为

$$\bar{P}_s = \frac{2hcv}{\eta_Q \lambda_0^2} \left[ \frac{\ln(1 - \sqrt[N]{1 - P_{Nd}})}{\ln(1 - \sqrt[N]{1 - P_{Nf}})} - 1 \right] \quad (13)$$

假设最终的虚警率为 1%、探测概率为 99%、目标速度的动态范围为 100 m/s、波长为 1064 nm、量子效率为 0.7, 则实际的探测灵敏度和探测脉冲数之间的关系如图 3 所示。

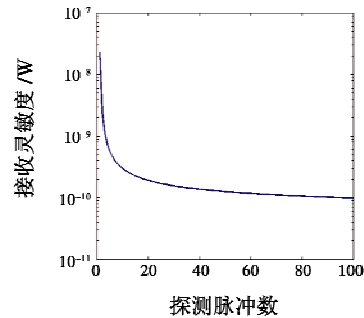


图 3 探测脉冲数对接收灵敏度的提升效果

Fig. 3 Detection pulse quantity vs receiving sensitivity

由图 3 可以看出, 当探测脉冲数增加时, 探测灵敏度也随之迅速增加, 10 次探测即可将探测灵敏度提升两个量级。当探测脉冲数超过 20 时, 脉冲数的进一步增加对灵敏度的提升作用逐渐趋于饱和。

### 4 结束语

本文针对相干激光雷达对漫反射目标探测的应用场景, 对接收灵敏度进行了分析。研究表明, 当考虑回波散斑场以及噪声电流的统计特性时, 相干激光雷达对虚警率和探测概率的指标要求、目标速度的动态范围以及探测波长等因素均会对接收灵敏度造成影响, 在对漫反射目标进行探测时需要进行综合考虑。与此同时, 采用多次探测的方法可以显著提升接收灵敏度。

本文的研究结果可作为相干激光雷达漫反射目标探测时灵敏度估算、指标论证的基本依据。在实际的相干激光雷达系统设计时, 还需要对激光器线宽、大气

湍流、光学系统的像差、装调误差等多方面因素进行考虑。如何综合各方面因素获取最优的探测性能,克服不利因素对探测性能的影响,值得未来从理论上和实验上进行进一步研究和探讨。

### 参考文献

- [1] 戴永江. 激光雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2010.
- [2] GSCHWENDTNER A B, KEICHER W E. Development of coherent laser radar at Lincoln laboratory[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2000, 12(2):383-396.
- [3] 刘华锋. 光电检测技术及系统[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2015.
- [4] PROTOPOPOV V V. Laser heterodyning[M]. Berlin:Spring-

er, 2009.

- [5] 董光焰,潘静岩,张鹏飞. 基于相干探测技术的远程激光雷达[J]. 现代雷达, 2018, 40(6):1-4.
- [6] 睦晓林,周寿桓,赵鸿,等. 一种全光纤结构的相干激光测速雷达研究[J]. 中国激光, 2013, 40(12):198-202.
- [7] GOODMAN J W. 统计光学[M]. 2版. 陈家璧,秦志诚,曹其智,译. 北京:科学出版社, 2018.
- [8] GOODMAN J W. 光学中的散斑现象—理论与应用[M]. 曹其智,陈家璧,译. 北京:科学出版社, 2009.
- [9] 宋凝芳,杨德钊,孙鸣捷. 散斑噪声对相干激光雷达系统性能的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(10):94-100.
- [10] 刘立人. 合成孔径激光成像雷达(VI):时空散斑效应和外差探测信噪比[J]. 光学学报, 2009, 29(8):2326-2332.

(上接第13页)

### 3 结论

本文针对杂波环境下多机动目标跟踪的问题,设计了一种JPDA-STF算法,该算法既保留了传统JPDA算法上的数据关联框架,又将STF算法的思想引入以修正模型误差。从仿真效果上看,该算法对多机动目标跟踪时比JPDA算法获取的跟踪精度更好。由于STF算法模型补偿能力有限,对于强机动目标而言,所提算法还不具备对如高超声速飞行器这类强机动高非线性的目标进行跟踪,因此在后续的研究中,需重点考虑如何实现对多强机动目标的跟踪。

### 参考文献

- [1] 恽鹏,吴盘龙,何山. 基于光电测量的双站系统多目标跟踪[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(2):209-214.
- [2] 李首庆,徐洋. 基于自适应聚概率矩阵的JPDA算法研究[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(2):340-347.

- [3] 张安清,郑润高. 基于有效量测分集的联合概率数据互联算法[J]. 电光与控制, 2012, 19(5):16-19.
- [4] LONG T, ZHENG L, CHEN X L, et al. Improved probabilistic multi-hypothesis tracker for multiple target tracking with switching attribute states[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(12):5721-5733.
- [5] GRANSTROM K, ORGUNER U, MAHLER R, et al. Corrections on: "extended target tracking using a Gaussian-mixture PHD filter"[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2017, 53(2):1055-1058.
- [6] CLARK D, VO B-N. Convergence analysis of the Gaussian mixture PHD filter[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(4):1204-1212.
- [7] 柏茂羽,丁勇,胡忠旺. 基于熵惩罚的EM未知杂波估计的PHD多目标跟踪算法[J]. 电光与控制, 2017, 24(4):27-32.
- [8] 谈发明,赵俊杰. 强跟踪变分贝叶斯自适应卡尔曼滤波算法[J]. 电光与控制, 2020, 27(1):12-16, 36.