

激光雷达光束的区域特征匹配识别方法

牛群, 屈静坤, 连文泽, 邓全, 屈恒阔

中国电子科技集团公司第二十七研究所光电系统部, 河南 郑州

收稿日期: 2024年3月14日; 录用日期: 2024年6月7日; 发布日期: 2024年6月18日

摘要

针对超远距离多功能激光雷达光束搜索识别的需求, 本文基于超远距离多功能激光雷达工作原理, 以识别区域激光光束特征代替传统单点式激光信号识别的思路, 提出激光光束区域特征匹配识别的方法, 在分析激光雷达脉冲激光光束能量分布理论的基础上, 构建常用脉冲激光光束时间序列上的能量区域分布模型, 选用综合距离和方向的修正余弦相似度的方法, 计算采集到的对端激光光束能量区域分布与各个能量区域分布模型的匹配相似度。仿真结果及试验结果均表明, 激光雷达光束的区域特征匹配识别方法与理论设想一致, 可以有效识别激光光束能量分布区域特征, 通常可在一个扫描周期完成对端激光光束的搜索、识别和锁定, 为大范围快速搜索提供技术支撑。

关键词

激光雷达, 区域特征, 光束能量分布, 匹配识别

Regional Feature Matching Recognition Method for Lidar Beam

Qun Niu, Jingkun Qu, Wenzhe Lian, Quan Deng, Hengkuo Qu

Department of Optoelectronic Systems, The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou Henan

Received: Mar. 14th, 2024; accepted: Jun. 7th, 2024; published: Jun. 18th, 2024

Abstract

Aiming at the requirement of ultra-long range multi-functional lidar beam search and recognition, based on the working principle of ultra-long range multi-functional lidar, this paper proposes the matching and recognition method of laser beam regional features to replace the traditional single-point laser signal recognition. On the basis of analyzing the lidar pulse laser beam energy distribution theory, The energy region distribution model of common pulsed laser beam time series

is constructed, and the matching similarity between the energy region distribution of the opposite laser beam and each energy region distribution model is calculated by using the modified cosine similarity method combining distance and direction. The simulation results and experimental results show that the regional feature matching recognition method of lidar beam is consistent with the theoretical assumption, and can effectively identify the regional features of laser beam energy distribution, and can usually complete the search, identification and locking of the opposite laser beam in one scan cycle, providing technical support for a large range of fast search.

Keywords

Laser Radar, Regional Feature, Beam Energy Distribution, Matching Recognition

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着航天领域科学研究的不断深入，超远距离多功能交会对接成为人类长期深空探测的保障。然而不同于传统合作目标模式的交会对接激光雷达，超远距离多功能激光雷达是自发他收模式，不能使用传统合作目标搜索方法中引导比较、波门限制等手段判断采集到激光信号的有效性，同时，由于背景环境中存在大量相同波段噪声信号，若采用传统单点式信号采集处理的方式，激光雷达因判断条件的缺失，抗干扰能力差，容易频繁尝试锁定干扰信号，导致双端无法收到对端激光光束，交会对接难以建链，进而超远距离多功能激光雷达任务失败。超远距离多功能激光雷达工作原理如下图 1 所示。

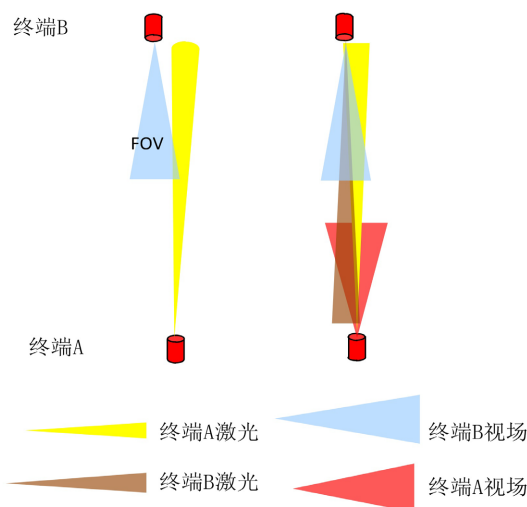


Figure 1. Working diagram of ultra long distance multi-functional lidar

图 1. 超远距离多功能激光雷达工作示意图

迄今为止，对激光雷达目标检测的研究重点主要集中于单点式回波能量，通过阈值、滤波和极大似然等方法，提取显著脉冲特征进行目标检测。本文以识别区域激光光束特征代替传统单点式激光信号判

别的思路,提出激光光束区域特征匹配识别的方法,在分析激光雷达脉冲激光光束能量分布理论的基础上,构建常用脉冲激光光束时间序列上的能量区域分布模型,计算采集到的对端激光光束能量区域分布与各个能量区域分布模型的匹配相似度。仿真结果表明,区域特征匹配识别方法可以有效识别激光光束区域特征,快速搜索并锁定对端激光光束,为大范围快速搜索提供技术支撑。

2. 激光光束能量分布建模及特征匹配方法

研究脉冲激光光束能量分布理论,以激光光束物理分布模型为基础[2],构建激光光束能量分布模型,是超远距离多功能激光雷达搜索识别对端信号的基础。

2.1. 脉冲激光光束能量分布理论及区域特征模型构建

2.1.1. 高斯能量分布模型

脉冲激光器发射激光时,能量分布是典型的高斯分布,能量强度主要集中在传播轴附近,脉冲激光光束的场分别指的是场在垂直于光束截面上的 x 轴与 y 轴的横向分布,脉冲激光光束的光强振幅用 A 表示[1],则有:

$$A = \frac{\omega_0}{\omega(d)} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(d)}\right) \quad (1)$$

其中, $\omega(d)$ 为光斑的半径,从上式可以得到,脉冲激光光束振幅的变化符合高正态分布,如图 2 中 a 所示。然而,随着传输距离的增大,光束逐渐发散,光斑越来越大,中心强度减小[2],如图 2 中 b 所示。

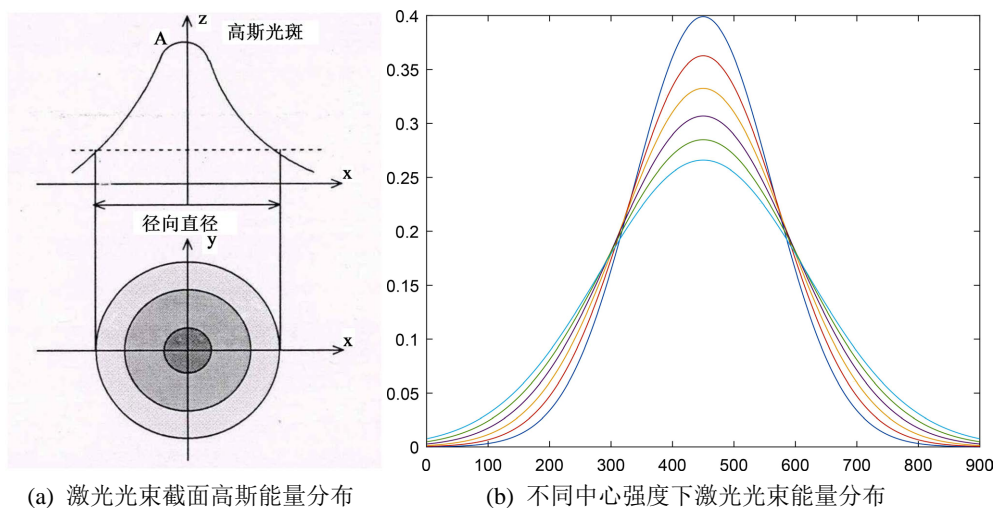


Figure 2. Energy distribution map of pulse laser beam cross-section

图 2. 脉冲激光光束截面能量分布图

由于激光雷达光束识别是在激光发射源的对端,故重点考虑信号采集端能量分布,构建激光光束能量中心强度平缓的高斯能量分布特征模型。

2.1.2. 半高斯能量分布模型

激光雷达终端 A 快速搜索过程中,存在终端 B 的激光光束未完全处于终端 A 接收视场范围的情况,此时终端 A 接收到的脉冲激光光束不是完整的高斯分布,而是高斯分布的部分区域。为保证区域特征模型的完整性,构建左侧高斯能量分布和右侧高斯能量分布模型(图 3)。

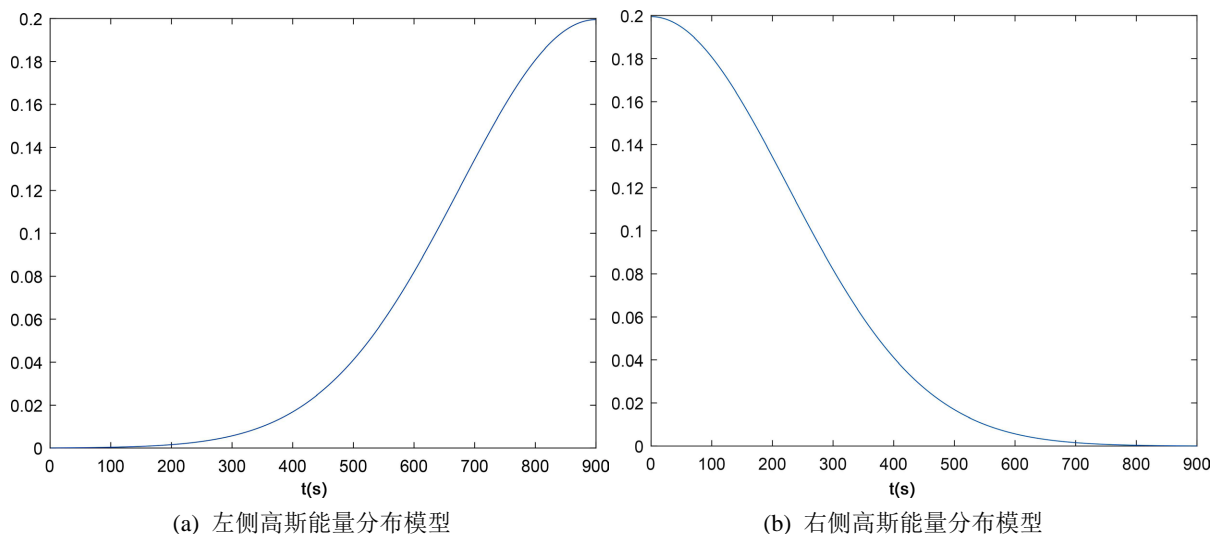


Figure 3. Semi Gaussian energy distribution model
图 3. 半高斯能量分布模型

2.1.3. 门限值能量分布模型

超远距离多功能激光雷达为自发他收的工作模式，激光器和探测器不在同一台设备，在交会对接建链前，两端设备工作状态互不可知。为保证激光信号的可靠采集，通常设置提高激光器的能量和探测器的灵敏度的策略。因此，激光雷达采集到的激光光束能量存在不出现理想高斯分布的现象。

由于激光器的能量和探测器的灵敏度的不匹配，一方面激光器发射激光光束整体能量偏高，另一方面探测器对高于一定能量的激光信号均会出现雪崩状态。两种情况或情况混合会出现采集到的激光光束信号中心一段区域内，均保持为定值，表现出平顶型或门限型的分布特征[4]，高斯能量分布和门限值能量分布趋势变化如下图 4 所示。

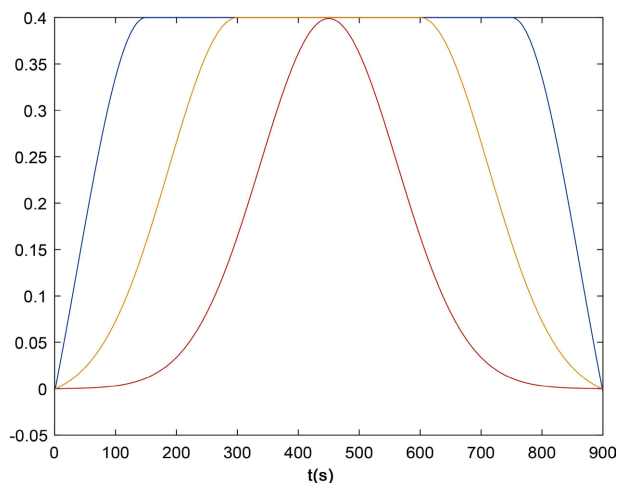
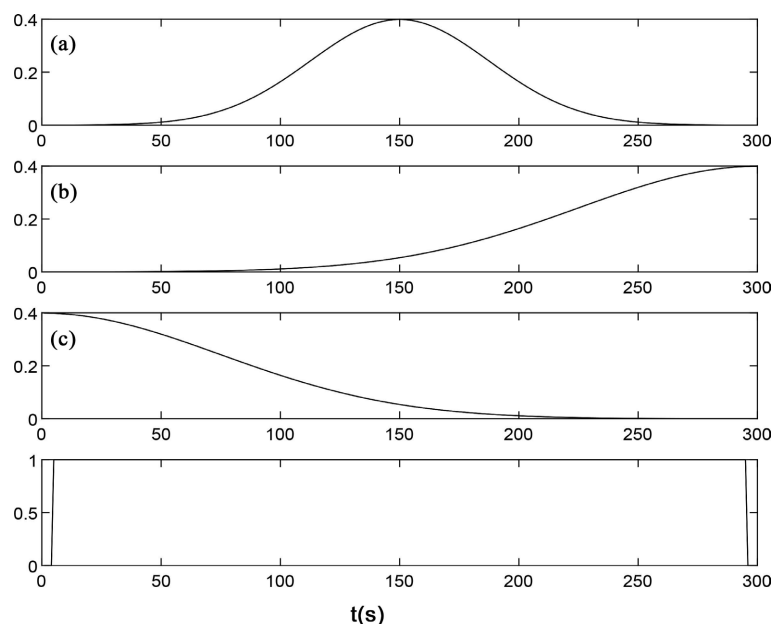


Figure 4. Gaussian energy distribution and threshold energy distribution map
图 4. 高斯能量分布及门限值能量分布图

针对超远距离多功能激光雷达工作条件，依据三种能量分布模型的研究，激光光束能量分布特征模型构建如下(图 5):



(a)高斯分布模型；(b)左侧高斯分布模型；(c)右侧高斯分布模型；(d)门限型分布模型

Figure 5. A model for energy distribution characteristics of pulsed laser beams
图 5. 脉冲激光光束能量分布特征模型

2.2. 修正余弦相似度

相似度度量或相似度函数(Similarity)是统计领域的一个实值函数,用以量化计算两个对象间的相似度。通常情况下,两个时间序列相似度度量的值越大,说明时间序列之间差异越小,相似度越高(图 6)。

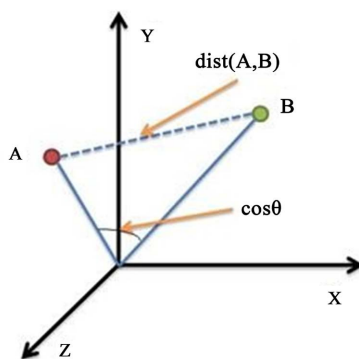


Figure 6. Similarity principle diagram
图 6. 相似度原理图

计算时间序列间的相似度度量时,一般定义为计算空间真实距离,最常用的是欧氏距离,即欧几里得距离。欧氏距离根据时间序列中元素各点坐标,计算各点间的绝对距离的和,以体现时间序列间整体绝对差异。欧氏距离不同维计算如下:

二维空间欧氏距离:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (2)$$

N 维空间欧氏距离:

$$d = \sqrt{\sum_{k=0}^n (x_{1k} - x_{2k})^2} \quad (3)$$

$$= \sqrt{(X_1 - X_2)(X_1 - X_2)^T}$$

用欧氏距离作为相似度度量时, 距离越小, 时间序列相似度越高, 其直观地表示了不同时间序列的数值差。然而随着数据维数的增加, 由于维数诅咒, 欧氏距离不断掩盖时间序列中的空间特征信息, 欧式距离的用处越来越小。

余弦相似度经常被用作解决高维数欧几里德距离问题的方法。余弦相似度就是两个向量间的夹角余弦值。如果将向量归一化为长度均为 1, 则向量的内积也相同。计算公式如下:

二维空间余弦距离:

$$\cos \theta = \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2}} \quad (4)$$

N 维空间余弦距离:

$$\cos \theta = \frac{\sum_{k=1}^n x_{1k} x_{2k}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n x_{1k}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n x_{2k}^2}} \quad (5)$$

$$= \frac{X_1 \cdot X_2}{|X_1| |X_2|}$$

因此, 欧氏距离仅关注两个时间序列在空间的绝对距离, 并未考虑数据的方向与趋势变化; 余弦距离关注两个时间序列在空间上方向差异, 并未考虑数据间的数值差。

修正余弦相似度的目的是解决余弦相似度仅考虑向量维度方向上的相似度, 而未考虑到数值变化对数据相似度影响的问题, 所以修正余弦相似度是令向量的每个维度减去维度均值后, 计算向量余弦相似度[3], 算法如下:

$$\cos \theta = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

其中, $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ 。

2.3. 目标区域特征匹配识别方法验证

依据工作原理, 两台激光雷达发射激光后, 终端 B 在指向终端 A 的条件下小范围慢速扫描, 终端 A 大角度($10^\circ \times 10^\circ$)快速扫描搜索终端 B 的激光光束, 采集扫描范围内的激光信号。

激光雷达扫描运动过程中, 扫描运动和激光光束信号采集具有相关性, 即终端 A 扫描角度变化的时候, 接收采集到的激光光束信号在不同角度呈现不同的能量值。

2.3.1. 方位方向

终端 A 方位方向上扫描运动过程中, 在 3.66° 到 4.75° 的角度范围内, 采集到激光信号, 下图左侧为存在激光信号时方位角度时间序列曲线, 右侧随方位角度增大过程中, 激光光束能量时间序列曲线(图 7)。

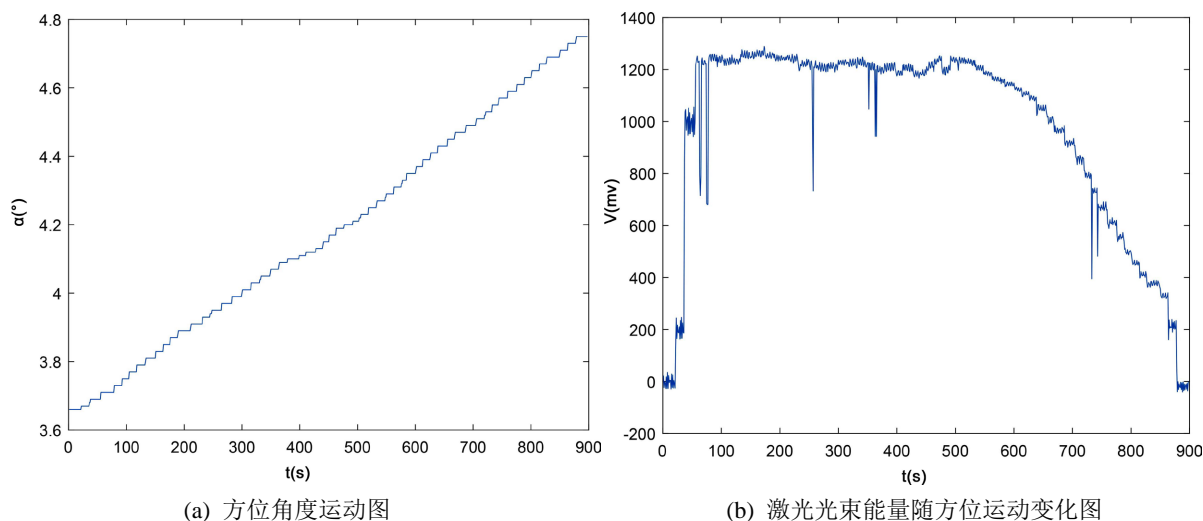


Figure 7. Time series diagram of lidar azimuth angle and energy
图 7. 激光雷达方位角度及能量时间序列图

首先根据采集到的激光光束能量区域，构建相同长度的四个激光光束能量分布模型，然后采用反归一化方法将模型幅值设置与采集到的激光光束能量最大值一致，以减少采集到的原始信号信息的丢失，最后分别计算激光光束区域能量分布与四个激光光束能量分布模型的修正余弦相似度。

经计算，采集的激光光束区域能量分布与高斯能量分布模型的修正余弦相似度为 0.7713，采集的激光光束区域能量分布与左侧高斯能量分布模型的修正余弦相似度为 0.3624，采集的激光光束区域能量分布与右侧高斯能量分布模型的修正余弦先相似度为 0.5009，采集的激光光束区域能量分布与门限值能量分布模型的修正余弦相似度为 0.7944。相似度匹配结果列为表 1 所示，结果图如图 8 所示(其中，x 轴 1 为高斯能量分布，2 为左侧高斯分布，3 为右侧高斯分布，4 为门限值分布，y 轴为采集信号与相应分布的相似度匹配结果)。

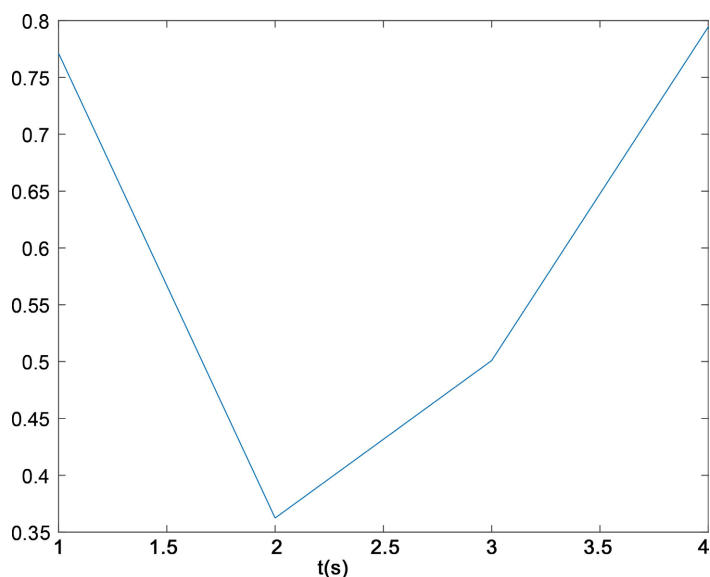


Figure 8. Matching results of lidar azimuth energy distribution
图 8. 激光雷达方位能量分布匹配结果图

Table 1. Matching results of lidar azimuth energy distribution**表 1.** 激光雷达方位能量分布匹配结果表

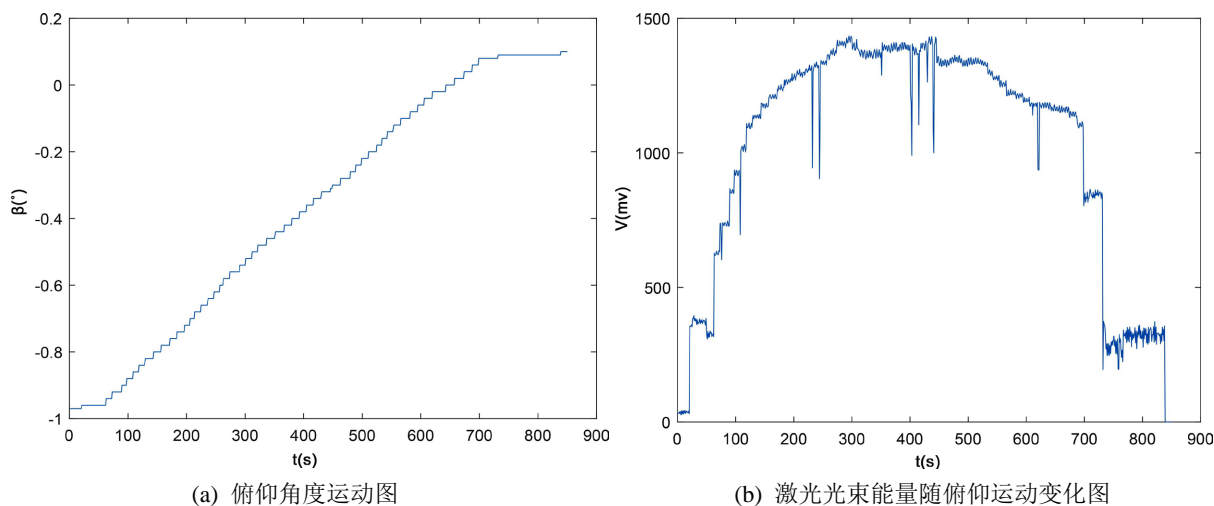
分布模型	相似度
高斯分布	0.7713
左侧高斯分布	0.3624
右侧高斯分布	0.5009
门限型分布	0.7944

采集的激光光束区域能量分布与四项能量分布模型修正余弦相似度的平均值为 0.60725，大于 0.5，因此采集的激光光束与构建的能量分布模型具有较强的匹配关系，即采集的激光光束为对端激光光束。

分析采集的激光光束能量时间序列图，其基本构型为门限型能量分布，随着方位方向角度的增大，激光光束能量呈现出了右侧高斯能量分布。在四项能量分布模型修正余弦相似度中，门限型能量分布模型修正余弦相似度最高，两个半高斯能量分布模型修正余弦相似度较低，右侧高斯分布模型修正余弦相似度大于左侧高斯分布模型修正余弦相似度，并且左侧高斯分布模型修正余弦相似度很小。

2.3.2. 俯仰方向

终端 A 俯仰方向上扫描运动过程中，在 -0.97° 到 0.1° 的角度范围内，采集到激光信号，下图左侧为存在激光信号时俯仰角度时间序列曲线，右侧随俯仰角度增大过程中，激光光束能量时间序列曲线(图 9)。

**Figure 9.** Time series diagram of lidar azimuth angle and energy**图 9.** 激光雷达方位角度及能量时间序列图

首先根据采集到的激光光束能量区域，构建相同长度的四个激光光束能量分布模型，然后采用反归一化方法将模型幅值设置与采集到的激光光束能量最大值一致，以减少采集到的原始信号信息的丢失，最后分别计算激光光束区域能量分布与四个激光光束能量分布模型的修正余弦相似度。

经计算，采集的激光光束区域能量分布与高斯能量分布模型的修正余弦相似度为 0.8199，采集的激光光束区域能量分布与左侧高斯能量分布模型的修正余弦相似度为 0.3837，采集的激光光束区域能量分布与右侧高斯能量分布模型的修正余弦相似度为 0.4412，采集的激光光束区域能量分布与门限型能量分布模型的修正余弦相似度为 0.7405。相似度匹配结果列为表 2 所示，结果图如图 10 所示(其中，x 轴 1

为高斯能量分布，2 为左侧高斯分布，3 为右侧高斯分布，4 为门限值分布，y 轴为采集信号与相应分布的相似度匹配结果)。

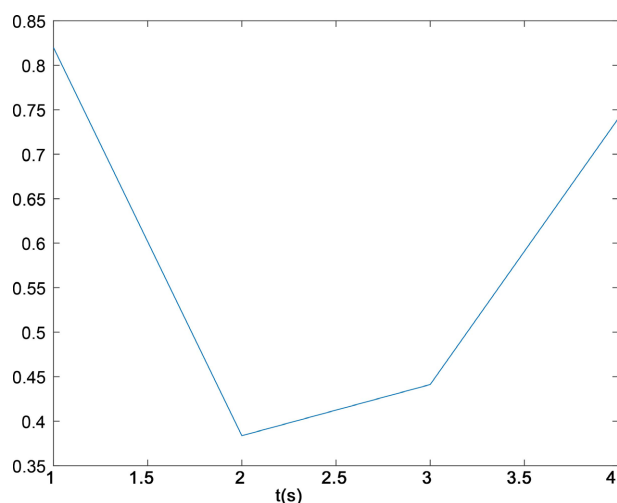


Figure 10. Matching results of lidar altitude energy distribution
图 10. 激光雷达俯仰能量分布匹配结果图

Table 2. Matching results of lidar pitch energy distribution
表 2. 激光雷达俯仰能量分布匹配结果表

分布模型	相似度
高斯分布	0.8199
左侧高斯分布	0.3837
右侧高斯分布	0.4412
门限分布	0.7405

采集的激光光束区域能量分布与四项能量分布模型修正余弦相似度的平均值为 0.596325，大于 0.5，因此采集的激光光束与构建的能量分布模型具有较强的匹配关系，即采集的激光光束为对端激光光束。

分析采集的激光光束能量时间序列图，其基本构型为典型高斯能量分布模型，并且符合随着传输距离的增大，光束逐渐发散，光斑越来越大，中心强度减小的激光光束能量分布理论。在四项能量分布模型修正余弦相似度中，高斯能量分布模型大于其他能量分布模型，门限值能量分布模型与采集的激光光束区域能量分布相似，因此修正余弦相似度也较高，两个半高斯能量分布模型不相似，故修正余弦相似度均较低。

激光雷达光束的区域特征匹配识别方法应用于超远距离多功能激光雷达交会对接试验，在终端 B 指向终端 A 且发射的激光光束在终端 A 接收视场内时，终端 A 激光雷达通常一个扫描周期结束后，便可完成对端激光光束的搜索、识别和锁定。

3. 结论

本文在分析激光雷达脉冲激光光束能量分布理论的基础上，构建常用脉冲激光光束时间序列上的能量区域分布模型，选用综合距离和方向的修正余弦相似度的方法，计算采集到的对端激光光束能量区域分布与各个能量区域分布模型的匹配相似度。仿真结果及试验结果均表明，激光雷达光束的区域特征匹

配识别方法与理论设想一致，可以有效识别激光光束能量分布区域特征，完成对端激光光束的搜索、识别和锁定。

在目标区域特征匹配识别方法验证章节中，一方面能量时间序列中的噪声不会对区域特征相似度造成影响，为激光光束识别抗干扰提供数据和理论支撑；另一方面激光光束区域特征与分布模型越相似，其修正余弦相似度越高，因此，区域特征匹配的方法具有一定的激光光束区域特征检测的能力，为超远距离多功能交会对接激光雷达目标识别和检测提供技术支持，提升激光雷达工作效率和可靠性。

参考文献

- [1] 王家乐. 基于光斑图像的激光能量密度分布测量技术[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- [2] 范永金, 吴刚. 远场激光光斑探测与图像能量分布显示[J]. 光电技术应用, 2014, 29(3): 13-16.
- [3] 张瑞典, 钱晓东. 用余弦相似度修正评分的协同过滤推荐算法[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(6): 1096-1105.
- [4] 张立, 温建伟, 王家乐, 等. 远场激光能量密度分布的数值与图像估算[J]. 计算机仿真, 2014, 31(8): 15-19+31.