

# 激光雷达的测距特性及其测距精度研究

姜海娇 来建成\* 王春勇 李振华

(南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094)

**摘要** 通过实验研究了阈噪比(TNR)不变时信噪比(SNR)对激光雷达测距特性的影响,结果表明,信噪比远高于阈噪比时,激光雷达测距数据的离散分布服从正态分布,且随着信噪比的降低,测距数据离散分布逐渐偏离正态分布,呈现上升沿陡下降沿缓的形式;当信噪比接近阈噪比时,测距数据的离散分布又逐渐趋向于正态分布,但此时激光雷达的漏测率迅速增加。在此基础上,采用置信概率 68.2% 对应置信区间的一半来衡量激光雷达的测距精度,并给出了测距精度计算方法,它能更准确地表征激光雷达测距数据的密集度,具有更好的普适性。

**关键词** 激光技术;激光雷达;测距精度;置信概率;置信区间;信噪比

**中图分类号** TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0514001

## Research on Ranging Property of Laser Radar and Its Range Accuracy

Jiang Haijiao Lai Jiancheng Wang Chunyong Li Zhenhua

(School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** The influences of signal to noise ratio (SNR) on the ranging property of laser radar with constant threshold to noise ratio (TNR) are studied comprehensively by experiments. The results indicate that when SNR is much higher than TNR, the distribution of laser radar's ranging data obeys the Gaussian distribution. And with the decrease of the SNR, the distribution gradually deviates from the Gaussian distribution, and its rising edge becomes steeper and the falling edge becomes more slowly. While the SNR is approaching the TNR, the distribution returns to the Gaussian distribution, but the missing rate increases rapidly. Based on the experiments, the half of the confidence interval with confidence probability of 68.2% is also introduced to evaluate the range accuracy of laser radar. The corresponding method for calculating the range accuracy is presented and used to evaluate the range accuracy of laser radar under different SNRs.

**Key words** laser technique; laser radar; range accuracy; confidence probability; confidence interval; signal to noise rate

**OCIS codes** 280.3640; 280.3400; 280.5600

## 1 引 言

相对于常规的固体激光雷达,激光二极管(LD)雷达在高重复频率、低功耗和小型化等方面有着不可替代的优势,是集成距离传感、立体成像或者视觉传感的重要途径,在文物复原、精确制导、机器视觉、靶场测试、车辆防撞、环境监测等领域有着极为重要的应用价值<sup>[1~7]</sup>。测距型固体激光雷达以调Q的脉冲激光为光源,以飞行时间测距原理为基础,通过恒

阈值鉴别和高精度的距离计时实现目标距离的测量过程。调Q激光脉冲具有兆瓦量级的峰值功率和纳秒量级的脉冲宽度,激光雷达测距数据的离散分布主要受噪声分布形式的影响,呈现近似正态分布形式。为此,通常用方差来衡量激光雷达的测距精度。Johnson等<sup>[8]</sup>研究了散粒噪声限的激光雷达系统测距精度边界问题,给出了泊松噪声分布假设下测距精度的Cramer-Rao下界;Steinvall<sup>[9]</sup>运用数值

收稿日期: 2010-11-30; 收到修改稿日期: 2011-02-14

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划(AD20320)资助课题。

作者简介: 姜海娇(1985—),男,博士研究生,主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: xiaofeixia\_900@163.com

导师简介: 李振华(1964—),男,博士,教授,主要从事激光探测与目标定位等方面的研究。

E-mail: lizhenhua@mail.njust.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: laijiancheng@mail.njust.edu.cn

仿真的方法给出了目标形状、探测器噪声以及湍流对激光雷达测距精度的影响;姚金良等<sup>[10]</sup>提出了运用图像配准叠加提高成像激光雷达测距精度的方法。然而,激光二极管雷达由于峰值功率较低,导致信噪比(SNR)较低。此时,回波波形对激光雷达测距特性的影响不可忽略,测距数据的离散分布将明显偏离正态分布,以方差为基础定义的测距精度概念不再适用,至今未见有对上述现象进行深入研究的报道。为此,本文在实验上研究了阈噪比(TNR)相同信噪比不同时激光雷达测距的统计特性,并在此基础上,引入置信概率 68.2% 对应的置信区间一半来衡量激光雷达的测距精度的新思路,有效解决了特殊条件下激光雷达测距精度的评价问题,给出了离散分布距离数据测距精度的计算方法,并将其用于激光雷达测距精度随信噪比变化关系的研究中。

## 2 激光雷达测距的统计特性

脉冲激光二极管很容易通过驱动电路的参数设置改变输出脉冲功率,能够在较小的空间范围内(几十到几百米)使激光雷达的信噪比可根据实验测量

的需要设定。因此,本文选用激光二极管雷达作为实验对象,研究不同信噪比条件下激光雷达的测距特性及其测距精度指标。

图 1 给出实验所用激光二极管雷达的原理框图,它由激光发射系统、激光回波接收放大系统、脉冲鉴别与距离计时电路等部分组成。其中发射天线焦距 20 mm、口径 16 mm,接收天线焦距 60 mm、口径 24 mm,鉴别电平 1650 mV,探测器为 C30950 光电二极管。其测距过程的工作原理为:在时序电路的控制下,脉冲激光二极管发射一个高峰值功率的激光脉冲,并启动计时电路开始计时;激光脉冲经光学天线准直后,射向待测目标;目标散射照在其上的激光脉冲,形成后向散射回波,并被激光雷达的接收天线接收,聚焦到光电二极管的光敏面上,将光信号转换成电信号,形成激光回波的电脉冲信号。电信号经前置放大电路放大后,进行恒阈值的回波鉴别;当鉴别到回波信号时,立即停止计时电路,并根据计时结果计算目标距离。最后,通过串口实时将测距数据传给计算机,进行统计和分析。

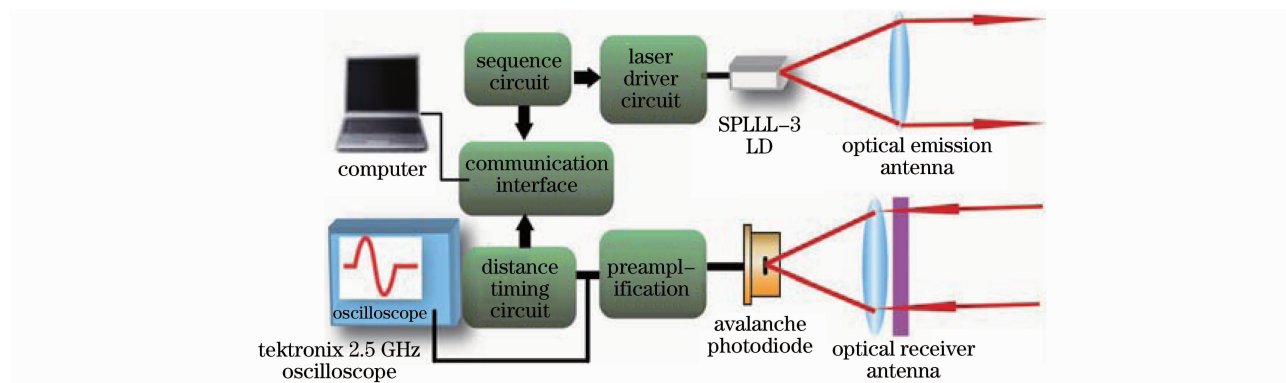


图 1 激光二极管雷达的实验原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of LD radar experiment

实验选择约 70 m 远的一堵白墙为测试目标,通过标准白板的比照测试,白墙的半球反射率约为 90%。实验时,大气的能见度约为 10 km,白墙表面的背景光辐照度约为  $800 \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ 。脉冲激光二极管的额定输出峰值功率为 70 W,通过改变激光二极管的驱动电压,可以直接控制它的输出功率,达到改变激光雷达信噪比的目的。

当激光二极管以额定功率 20 W 输出激光脉冲时,激光二极管雷达工作时的信噪比为 30.4,激光回波波形如图 2 所示。为了尽可能减小电路噪声和干扰的影响,在大量实验的基础上,将阈值电平设置为 1650 mV,此时激光二极管雷达的工作状态较为

理想。此时的阈噪比为 16.72,错测率接近于 0,虚警率极低。在此条件下,对同一目标进行 10 万次定点测距,统计测距数据的离散分布直方图,并做归一化处理。图 3 给出了对应测距数据的统计分布曲线,纵坐标为 10 万次测量落在该距离上的百分数。从图中数据可以看到,测距数据的离散分布与正态分布吻合较好,吻合程度达到了 99.99%。

改变激光二极管的驱动电路参数,调节激光二极管的输出功率来改变激光雷达测距的信噪比。图 4 给出了 8 种不同信噪比条件下激光雷达测距数据的离散分布曲线。统计样本量同样为 10 万个,并将曲线做归一化处理。

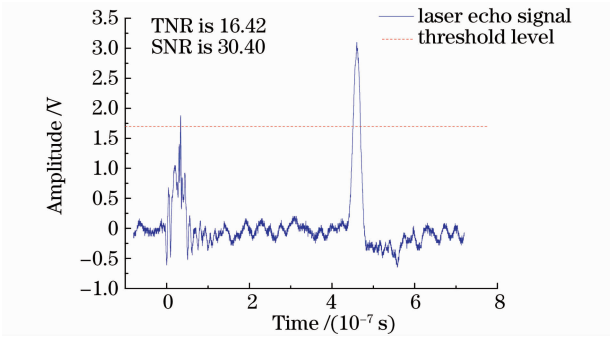


图2 发射功率为 20 W 时的激光回波和噪声信号  
Fig.2 Laser echo waveform and noise signal when emitting power is 20 W

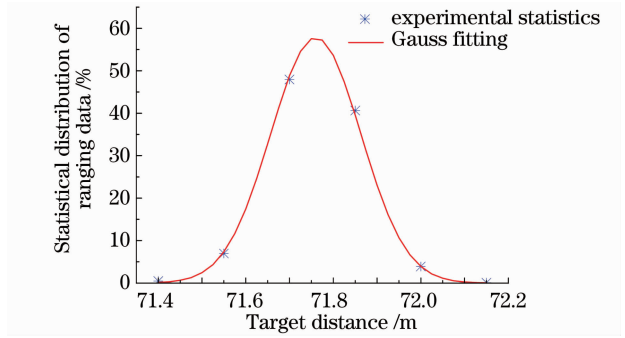


图3 发射功率为 20 W 时的测距数据统计分布  
Fig.3 Range distribution when emitting power is 20 W

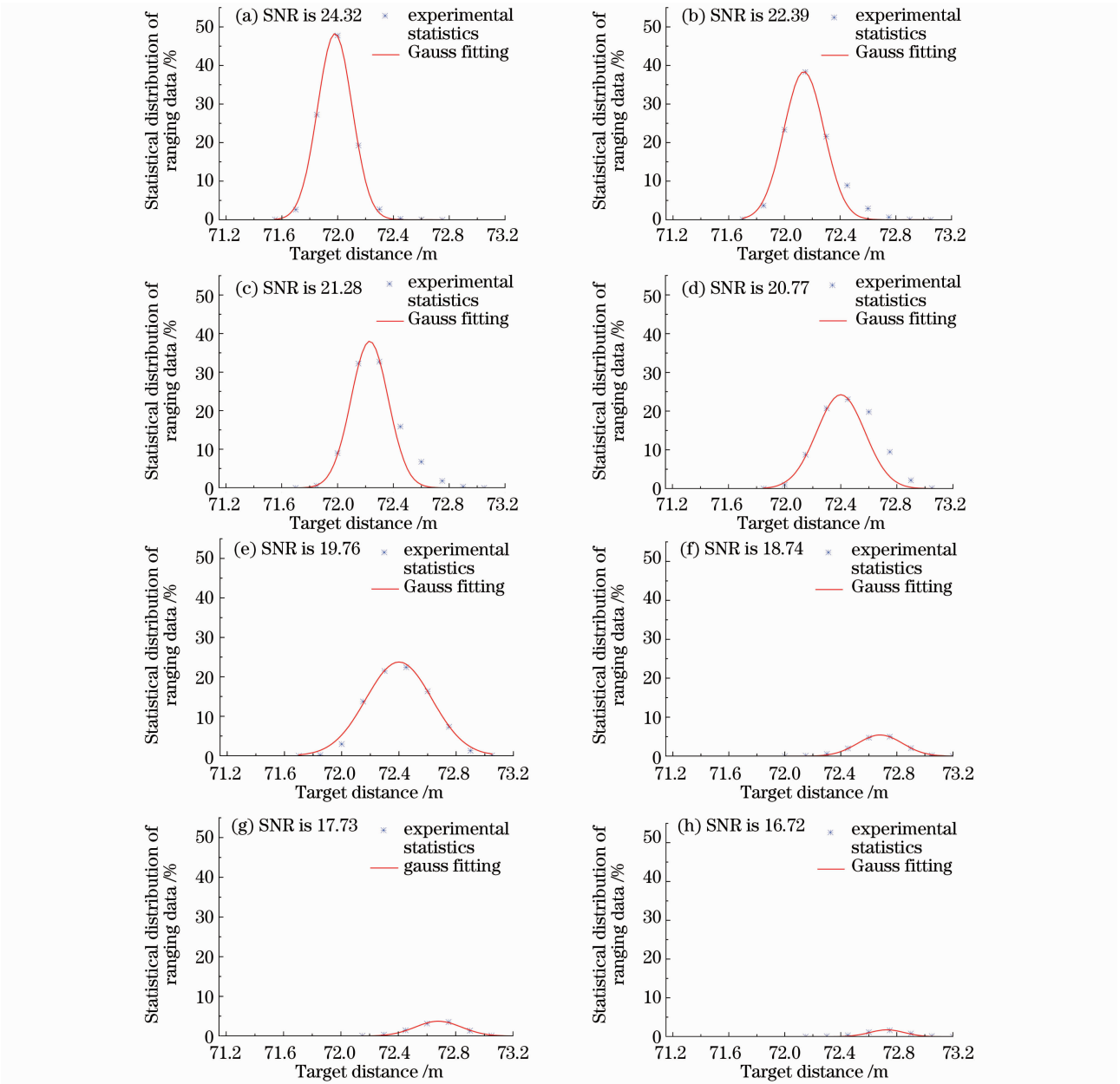


图4 不同信噪比时激光雷达测距数据的离散分布曲线  
Fig.4 Laser radar ranging distribution curves with different SNRs

对比图 4 中不同信噪比条件下的激光雷达测距数据离散分布曲线,可以看到,信噪比远高于阈噪比时,测距数据的离散分布较好地服从正态分布;随着信噪比的逐渐降低,如图 4(a)~(d)所示,测距数据的离散分布范围明显增大,测距数据的密集度逐渐变差,且分布形式逐渐偏离正态分布。具体表现为测距统计分布的不对称性,离散分布的上升沿较陡,且与正态分布吻合较好,下降沿却比上升沿缓;当信噪比接近阈噪比值时,激光雷达的漏测率显著增加,此时测距数据的离散分布又逐渐趋向于正态分布,且测距数据的离散分布范围又逐渐变小,在剔除漏测数据的情况下,测距数据的密集度有所改善。

激光雷达测距数据分布的上述统计特性直接由激光雷达接收机的噪声特性和激光回波的波形特征所决定。在信噪比远高于阈噪比时,噪声是引起测距数据离散分布的主导因素。信噪比远高于阈噪比时,激光脉冲回波波形的上升沿较陡,噪声引起阈值鉴别点处回波信号的时间抖动较小,这使得测距数据的离散分布范围较小。此外,在信噪比远高于阈噪比时,阈值点附近信号上升沿可由直线近似描述。在这种情况下,测距统计分布的结果主要由噪声的分布形式决定,即满足正态分布形式。这是以往激光测距研究所遇到的一般情况,在这种情况下测距数据是服从正态分布的,这是用标准差来衡量激光雷达测距精度的理论基础。

随着信噪比的逐渐降低,阈值点附近信号上升沿的波形也将显著影响激光雷达测距数据的离散分布形式,这将导致测距数据的分布形式偏离正态分布。由于激光回波上升沿较缓,噪声能够引起阈值点的时间抖动明显增大,这使得测距数据的分布范围变宽。测距数据分布的不对称性(偏离正态分布)是因为阈值点上下斜率的绝对值明显不同,而且阈值点以上的上升沿形状决定了测距数据离散分布的后半截,阈值点以下上升沿形状决定了测距数据离散分布前半截。对于洛伦兹信号的上升沿而言,阈值鉴别点以上位置的斜率明显小于阈值点斜率,而阈值鉴别点以下位置的斜率与阈值点的斜率较为接近,这使得测距数据分布的上升沿接近于正态分布,而下降沿明显缓于上升沿。以往研究没有足够重视这种情况的存在,主要是因为传统的固体激光雷达采用的是单脉冲测距方式,这种方式要求激光雷达的信噪比远高于阈噪比,才能保证高的有效数据率;但是激光二极管雷达(测距机)采用了多脉冲相关测距,这极大放宽了对信噪比的要求,使得激光二极管

雷达工作的信噪比有可能接近阈噪比,且具有较高的有效数据率,因此讨论信噪比接近阈噪比时激光雷达的测距特性同样具有重要的意义。

当信噪比接近或低于阈噪比时,只有激光回波峰值附近很小区域的信号才有可能达到阈值电平位置,这时激光二极管雷达漏测率将明显上升。此外,由于激光回波峰值附近上升沿与下降沿具有绝对值几乎相等的斜率,这使得测距数据的离散分布又趋向于对称分布,同时在峰值点附近小区域内斜率几乎为 0,且变化非常缓慢,这使得测距数据的离散分布又趋近于正态分布,且在剔除漏测数据后,测距数据的分布范围又有所减小。在这种情况下,漏测率很高,单脉冲测距方式是无法进行的,但对于能高重复频率工作的激光二极管雷达(几十或几百千赫兹)而言,通常可以通过多脉冲相关探测的方式将漏测率降到可实用的要求之下,在激光二极管雷达(测距机)的工作中通常会遇到这种情况。

此外,从图 4 还可以看到,随着信噪比的下降,激光雷达的测距值呈现单调上升的趋势。这是恒阈值鉴别方式的固有特征。如图 5 所示,信号 A 的幅值明显高于信号 B,恒阈值鉴别得到的时间点  $t_a$  和  $t_b$  的关系为  $t_a < t_b$ ,这正好与图 4 给出的结果一致。

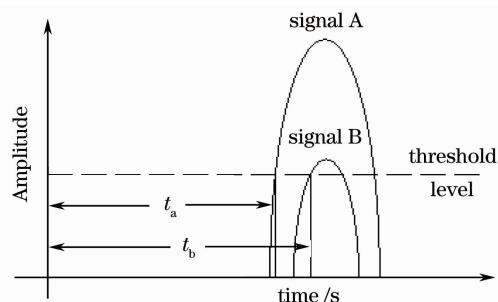


图 5 激光雷达恒阈值鉴别方式原理图  
Fig. 5 Schematic diagram of laser radar in threshold discrimination

### 3 不同信噪比条件下激光雷达的测距精度

在现有激光雷达测距性能评价体系中,“测距精度”定义为测量的目标距离与测距均值的相对误差分布,一般按标准差计算<sup>[11~13]</sup>。此定义要求测距数据的离散分布必须服从正态分布。从 2 节的实验结果可以看到,在信噪比远高于阈噪比时,测距数据离散分布服从正态分布是比较容易满足的,但在信噪比较低时,测距数据分布将明显偏离正态分布,上述定义不再适用。要想在不同信噪比条件下,全面评



定激光雷达的测距精度,必须拓展激光雷达测距精度的内涵。

事实上,对于测距数据统计偏离正态分布的情况,可以将“方差”的概念推广为置信概率 68.2% 所对应的置信区间一半。置信概率 68.2% 所对应的置信区间  $[a, b]$  定义为

$$\begin{cases} F(x) = \int_a^b f(x) dx = 0.682 \\ f(a) = f(b) \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $f(x)$  为测距数据离散分布的概率密度函数。

在测距数据服从正态分布时,“1 倍方差”所对

应的数据分布范围正好是峰值附近与置信概率 68.2% 所对应的置信区间一半,如图 6(a) 所示。对于测距数据分布明显偏离正态分布的情况,同样可以用置信概率 68.2% 对应的置信区间的一半来衡量测距数据的离散分布情况。

基于上述考虑,选用置信概率 68.2% 所对应的置信区间的一半代替方差来衡量激光雷达的“测距精度”。当测距数据服从正态分布时,该置信区间的一半正好与方差相一致,与现行通用的“测距精度”概念相兼容。

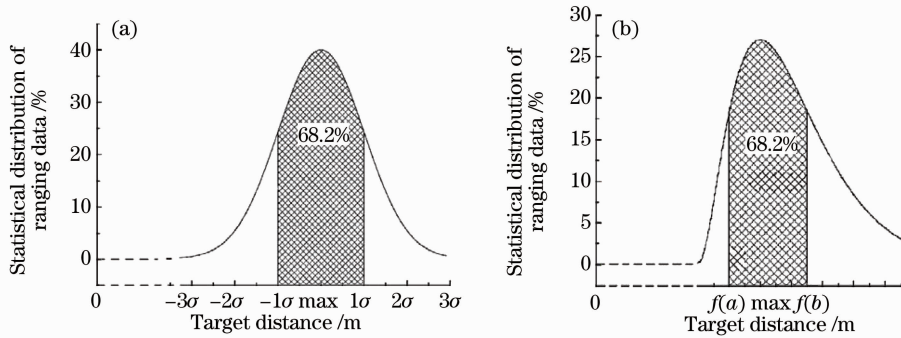


图 6 正态(a)和非正态(b)分布情况下置信概率 68.2% 所对应的置信区间

Fig. 6 Confidence interval with confidence probability of 68.2% of normal (a) and asymmetrical (b) distributions

实际上,激光雷达测距数据是以测距分辨率为间隔的离散数据点,置信概率 68.2% 对应的置信区间的边界正好落在测距数据点上的概率极低,因此如何确定置信概率 68.2% 对应的置信区间的上下边界是准确计算激光雷达测距精度的关键所在。为此,假设每个距离值上是以测距分辨率为宽度的对称均匀分布,分布区间的积分值为该点的归一化测

距数目,分别如图 7(a) 和(b) 所示。以测距统计峰值为中心,逐步扩大置信区间的上下界,直至累加概率为 68.2% 为止;假如左右两侧同时遇到测距数据点,则以该数据点为中心均匀增大或减小置信区间的边界,直至测距数据的概率和为 68.2%,此时对应的距离值恰好为置信区间的上下边界。

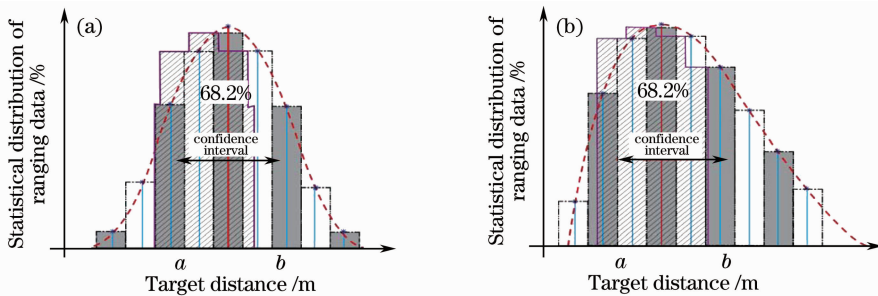


图 7 (a)对称分布与(b)非对称分布的离散测距置信区间

Fig. 7 Confidence interval of discrete range date of (a) normal and (b) asymmetrical distributions

图 8 给出了在阈噪比不变的情况下,置信概率 68.2% 所对应的置信区间随信噪比的变化曲线。从曲线的分布可以看到,在信噪比远高于阈噪比的情况下,置信区间相对于测距数据的峰值位置对称分布,且置信区间较小,测距精度较高;当信噪比逐渐

减小时,置信区间相对于测距数据的峰值位置分布不再对称,正的偏差明显大于负的偏差,同时置信区间较大,测距数据的密集度明显变差。这恰好与低信噪比条件下,激光雷达测距数据统计分布上升沿陡而下降沿缓的特征相吻合;当信噪比进一步接近

阈噪比时,测距数据的置信区间达到极大值后,又开始逐渐减小,这与2节的讨论相一致。

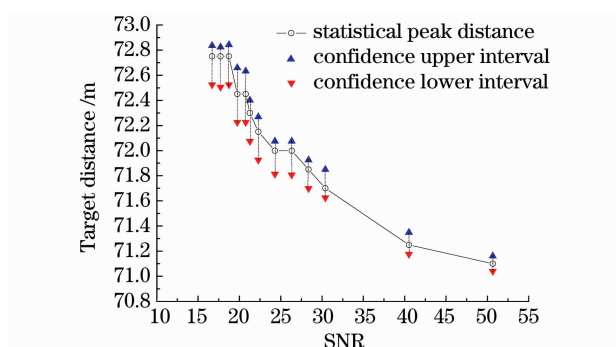


图8 68.2%置信概率对应的置信区间随信噪比的变化

Fig. 8 Relationship between confidence interval with confidence probability of 68.2% and SNR

在此基础上,根据“测距精度”的新定义,计算了不同信噪比条件下激光雷达的测距精度,如表1所示,它们分别与图4中不同信噪比条件下激光雷达测距数据的离散分布相对应。从表中数据可以看到,当信噪比为50.66时,激光雷达的测距精度(置信概率68.2%对应的置信区间的一半)为0.0607,此时如果用方差衡量激光雷达的测距精度,则为0.0658,两者吻合较好。由此可见,激光雷达测距精度在信噪比远高于阈噪比时具有很好的一致性,这也再次验证了激光雷达测距精度定义的正确性;随着信噪比的降低,激光雷达的测距精度逐渐变差,当信噪比下降到19.76时,激光雷达的测距精度为0.2170,测距数据的密集度最差;随着信噪比进一步接近阈噪比,测距数据的密集性又有一定程度的改善。

表1 不同信噪比条件下激光雷达的测距精度

Table 1 Laser radar range accuracy of different SNRs

SNR	Range accuracy /m
50.66	0.0607
40.53	0.0867
30.40	0.1124
28.37	0.1126
26.34	0.1344
24.32	0.1630
21.28	0.1313
22.29	0.1717
20.77	0.2038
19.76	0.2170
18.74	0.1590
17.73	0.1597
16.72	0.1553

## 4 结 论

建立了输出功率可调的激光二极管雷达测距特性研究的实验装置,并在不同信噪比条件下进行了大量的定点测距实验和分析比较。结果表明,当信噪比远高于阈噪比时,测距数据的离散分布服从正态分布;随着信噪比的降低,测距数据离散分布逐渐偏离正态分布,呈现上升沿陡下降沿缓的形式;当信噪比接近阈噪比时,测距数据的离散分布又趋向于正态分布,但漏测率迅速增加。在此基础上,提出了以68.2%置信概率对应置信区间的一半衡量激光雷达测距精度的新方法,给出了离散数据点测距精度的计算方法,并将其应用于实际激光雷达系统的测距精度评价。结果表明,当信噪比逐渐减小至阈噪比时,测距精度先变差到极值然后又会出现一定程度的改善,以置信区间表征的测距精度能很好地反映测距数据离散分布的密集度,具有很强的普适性。

## 参 考 文 献

- 1 J. A. Beraldin, F. Blais, P. Boulanger *et al.*. Real world modelling through high resolution digital 3D imaging of objects and structures [J]. *ISPRS J. Photogramm.*, 2000, **55** (4): 230~250
- 2 G. Guidi, J. A. Beraldin, C. Atzeni. High-accuracy 3-D modeling of cultural heritage: the digitizing of donatello's "maddalena" [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, **13**(3): 370~380
- 3 O. K. Steinvall, L. M. Klasen, C. A. Gronwall *et al.*. 3D laser sensing at FOI: overview and a system perspective[C]. *SPIE*, 2004, **5412**: 294~309
- 4 K. Saneyoshi, K. Hanawa, K. Kise *et al.*. 3-D Image recognition system for drive assist[C]. *Intelligent Vehicles '93 Symposium*, 1993, 60~65
- 5 J. Busck, H. Heiselberg. Gated viewing and high-accuracy three-dimensional laser radar[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(24): 4705~4710
- 6 Gong Tian'an, Wang Yuncai, Kong Lingqin *et al.*. Chaotic lidar for automotive collision warning system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2426~2430  
龚天安, 王云才, 孔令琴等. 面向汽车防撞的混沌激光雷达[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2426~2430
- 7 Dong Yunsheng, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Application study of lidar in urban traffic pollution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 315~320  
董云升, 刘文清, 刘建国等. 激光雷达在城市交通污染中应用研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 315~320
- 8 S. E. Johnson, T. L. Nichols, P. Gatt *et al.*. Range precision of direct-detection laser radar systems[C]. *SPIE*, 2004, **5412**: 72~86
- 9 O. Steinvall. Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(24): 4381~4391
- 10 Yao Jinliang, Yan Huimin, Zhang Xiuda *et al.*. Image registration and superposition for improving ranging accuracy of imaging laser radar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37** (6): 1613~1617

- 姚金良, 严惠民, 张秀达等. 一种应用图像配准叠加提高成像激光雷达测距精度的方法 [J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1613~1617
- 11 Commission of Science, Technology and Industry for National Defense. General Specifications for Solid Pulsed Laser Rangefinders GJB1324-91[S]. Beijing: China Standard Press, 1991
- 12 Commission of Science, Technology and Industry for National Defense. Parameter Series for Pulsed Laser Rangefinders GJB2740-96[S]. Beijing: China Standard Press, 1996
- 13 Commission of Science, Technology and Industry for National Defense. Performance Test Method for Pulse Laser Rangefinder GJB2241.2-2006[S]. Beijing: China Standard Press, 2006

\*\*\*\*\*

## 《光电产品与资讯》第 11 期“中国的大光学产业”专刊征稿启事

《光电产品与资讯》杂志是中国激光杂志社 2010 年隆重推出的一本以产品和市场资讯为主的信息类期刊。该刊立足光电领域,全年 12 期分别以不同的主题全面介绍技术与市场的最新进展。凭借中国激光杂志社的深厚学术底蕴及强大的采编力量,深入浅出地剖析光电行业事件,详细介绍光电产品的实际应用,在科研与产业之间架起一座互通的桥梁。并致力于成为读者了解市场、选购产品的重要参考,企业推广产品的首选平台。

我们 2011 年第 11 期策划“中国的大光学产业”专刊(英文版)。内容涵盖国内各地区的光学产业发展规划,全面展示最新光电技术的发展趋势、优秀产品的应用案例及实用指南等,特向广大读者征稿。该期杂志将于 2012 年 1 月份参展美国西部光电展。

**征稿范围:** 光学、光电子学领域

**稿件类型:** 1)国内外知名专家、企业高管撰写的最新光电技术或市场发展趋势;

2)光电产品及技术的行业应用案例分析;

3)产品使用心得、经验技巧、故障排除等实用指南类型的文章。

**字数:** 2500~4000 字

**专刊截稿日期:** 2011 年 8 月 31 日

**稿件格式要求:** 投稿文体为英文,请使用 word 格式,文章最后列出所有作者姓名、单位名称、职务或者职称、联系电话及 E-mail、邮寄地址和邮编。

请将稿件发至 oepn@siom.ac.cn,邮件主题请标明“中国的大光学产业”专刊投稿。有任何问题请咨询李洪丹编辑,电话:021-69918166。

## SPECIAL ISSUE CALL FOR PAPER 2011 ISSUE 11 “China's Big Optical Industry”

OE Product & News is a new magazine of Chinese Laser Press. It's featured by optoelectronics news, products and market reports, and the circulation covers OE-related companies, universities and institutes. It aims to accelerate China OE research and industrial development. The main columns include news, viewpoint, interview, focus, technology exchange, product information, etc. OEPN provides a channel to know the OE market and buy devices, and it is also a favorable platform of promoting products for companies.

The topic of NO.11 is China's Big Optical Industry. It will report the development of optical industry in China, application analysis of optical products and so on. The magazine will be distributed in Photonics West 2012. We hope you can write some articles to us.

**Topics include:** optics, optoelectronics

**Type:** 1) latest optoelectronics technology or market development trend in China written by experts or enterprise general managers;

2) industry application analysis of optoelectronics products and technology;

3) practical types of articles, e.g. your experience, comments about the product, trouble removal.

**Article length:** 2500~4000 words

**Deadline:** 2011.8.31

**Form:** please write the paper in English and send it to: oepn@siom.ac.cn. The author's name, company, position or title, telephone, E-mail, delivery address and postcode should be given. If you have any question, please call: 021-69918166.