

机载多脉冲激光测距特性及其不确定度研究

寇添 王海晏 王芳 吴学铭 王领 徐强

Ranging characteristic and uncertainty of airborne multi-pulse laser

Kou Tian Wang Hai-Yan Wang Fang Wu Xue-Ming Wang Ling Xu Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 120601 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.120601

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.120601>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

243 nm 稳频窄线宽半导体激光器

A narrow linewidth diode laser at 243 nm

物理学报.2015, 64(13): 134205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134205>

双路激光混沌复用系统的混沌同步及安全性能研究

Performance of chaos synchronization and security in dual-chaotic optical multiplexing system

物理学报.2015, 64(12): 124206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124206>

有机激光材料及器件的研究现状与展望

Current research and future development of organic laser materials and devices

物理学报.2015, 64(9): 094202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094202>

透射光栅谱仪测谱不确定度分析

Uncertainty analysis of the measured spectrum obtained using transmission grating spectrometer

物理学报.2013, 62(17): 170602 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.170602>

沿时间逐步求解应力的拉格朗日分析方法研究

Study on Lagrangian analysis for solving the stress gradually along the time

物理学报.2012, 61(20): 200703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.200703>

机载多脉冲激光测距特性及其不确定度研究*

寇添^{1)†} 王海晏¹⁾ 王芳¹⁾ 吴学铭¹⁾ 王领¹⁾ 徐强²⁾

1) (空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

2) (解放军 95949 部队, 沧州 061000)

(2014 年 12 月 26 日收到; 2015 年 1 月 21 日收到修改稿)

针对机载平台特殊环境下激光测距的概率特性, 建立了脉冲回波信号的理论分析模型, 得出了不同信噪比情况下脉冲回波信号包络的概率密度分布函数. 结果表明: 信噪比的降低通过回波波形直接导致测距离散数据的不同分布, 大信噪比时呈现高斯分布, 小信噪比时近似瑞利分布, 一般情况符合莱斯分布; 根据恒比定时时刻鉴别方法, 在获取大量实验数据的基础上, 实验结果验证了理论模型的合理性. 对以“方差”定义的测距精度不适用的情况下, 引入测量不确定度的概念, 结合不确定度原理, 通过分布区间概率量化了实验结果, 提出了一种新的评价机载激光测距性能的方法, 该方法能够克服传统评价指标的单一性以及不合理性, 同时为机载光电系统的性能测试与评估提供了参考意义.

关键词: 多脉冲激光, 恒比定时法, 信噪比, 不确定度

PACS: 06.20.Dk, 07.05.Kf, 42.68.Sq, 42.55.Px

DOI: 10.7498/aps.64.120601

1 引言

作为非接触式的测量手段, 激光测距与其他测量方法相比, 具有重复频率高、测量速度快、精度高、距离远、抗干扰能力强等性能优点, 在军事装备和航空航天领域得到广泛应用^[1-3]. 目前, 光学测距方法主要有相位法和脉冲法^[4]. 随着高功率半导体激光器的发展, 脉冲法测距可达到几十千米^[5], 这可满足机载激光探测系统对空、对地的目标测距要求. 基于飞行时间原理的测距技术已普及到工程实际, 相应的时刻鉴别技术主要有恒阈值法和恒比定时法等^[6]. 恒阈值技术由于脉冲到达时刻的判断会因为脉冲幅度和波形形状变化而引起偏移, 易造成测距误差. 恒比定时技术能够减小目标反射特性对时刻鉴别产生的影响, 但对回波形状的要求非常高.

在静态环境测距精度方面, Johnson 等^[7]基于激光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^[8]运

用数值拟合的方法给出了目标特性和噪声信号对激光探测系统测距精度的影响; 其他的大部分研究^[9,10]都基于高斯信号的分布形式进行数据处理, 用方差来衡量脉冲激光探测系统的测距精度. 然而, 由于机载平台的高动态性和强振动性, 以及大气湍流、跟瞄抖动、目标姿态变化等使得测距过程是一种概率事件, 在这种特殊环境下, 多脉冲激光测距系统信噪比较低, 且噪声叠加情况复杂, 导致回波信号强度起伏明显, 测距数据的离散分布将明显偏离高斯分布, 以方差为基础定义的测距精度概念不再适用, 这样就不能全面客观地评价激光系统的测距性能^[11].

本文基于恒比定时时刻鉴别方法, 深入研究了机载脉冲激光测距的回波波形和测距统计特性以及测距不确定度的量化分析. 由于回波信号表达式较复杂, 很难从中判定接收信号的高斯性, 对于这类随机误差因素, 结合恒比定时时刻鉴别技术, 先理论分析回波信号波形, 通过对大量实测数据结果的处理, 发现测距数据的分布形式在恒比定时条件

* 国家自然科学基金 (批准号: 61172083) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shanxiakkt@163.com

下随信噪比的变化而呈现不同的分布特性. 同时, 结合测距不确定度原理, 对机载多脉冲激光系统的测距性能提出了新的评价方法.

2 多脉冲激光测距特性

2.1 理论分析

恒比定时时刻鉴别方法就是对信号回波波形前沿的半高度进行鉴别, 以它作为停止计时时刻, 如图 1 所示. 信号 A 与 B 为两个不同信噪比情况下的回波波形, 由于波形的差异, 引起了时刻鉴别误差 Δt , 从而直接导致测距误差的产生.

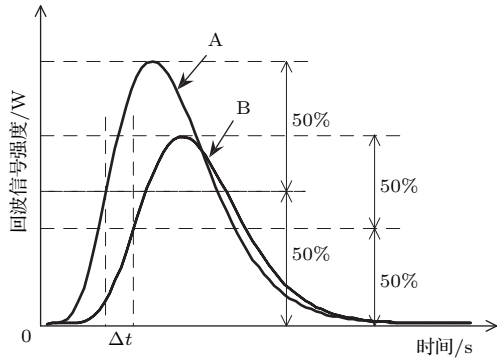


图 1 恒比定时时刻鉴别原理示意图

Fig. 1. The schematic diagram of time discriminator based on constant-ratio.

在机载平台下, 激光测距误差包括机体振动引起的误差、大气湍流引起的误差、探测器噪声引起的误差、脉冲延迟展宽误差以及幅度变化引起的漂移误差, 多种误差的叠加使得测距特性呈现一种窄带高斯随机过程, 回波波形包络不再是高斯波形. 在恒比定时条件下, 不同波形对激光探测系统测距精度影响很大. 一般将环境振动 (包括机体振动、大气扰动等) 和探测器引起的噪声共同作用的随机误差表示为^[12]

$$V(t) = V_s(t) \cos(\omega_c t + \theta) + V_\xi(t), \quad (1)$$

式中, $V_s(t)$ 是目标反射回波信号振幅; $V_\xi(t)$ 表示随机噪声; θ 是余弦波的随机相位, 在 $(0, 2\pi)$ 上均匀分布.

从大量的激光测距回波波形结果可以看出, 回波信号中夹杂的这种噪声可先看成是窄带高斯噪声, 其均值为零, 方差为 σ_n^2 . 窄带随机过程的谱密度集中在中心频率 f_c 附近相对窄的频带范围 Δf 内, 即满足 $f_c \gg \Delta f$, 且 f_c 远离零频率. 窄带随机过程 $V_\xi(t)$ 可用下式表示:

$$V_\xi(t) = a_\xi(t) \cos(\omega_c t + \varphi_\xi(t)) \quad (a_\xi(t) \geq 0),$$

即

$$V_\xi(t) = V_b(t) \cos(\omega_c t) - V_c(t) \sin(\omega_c t), \quad (2)$$

其中,

$$V_b(t) = a_\xi(t) \cos \varphi_\xi(t), \quad V_c(t) = a_\xi(t) \times \sin \varphi_\xi(t),$$

$V_b(t)$ 和 $V_c(t)$ 分别是 $V_\xi(t)$ 的同相分量和正交分量; $a_\xi(t)$ 和 $\varphi_\xi(t)$ 分别是窄带随机过程 $V_\xi(t)$ 的随机包络和随机相位. 于是, 回波信号可以进一步表示为

$$\begin{aligned} V(t) &= (V_s(t) \cos \theta + V_b(t)) \cos(\omega_c t) \\ &\quad - (V_s(t) \sin \theta + V_c(t)) \sin(\omega_c t) \\ &= e_b(t) \cos(\omega_c t) - e_c(t) \sin(\omega_c t) \\ &= e(t) \cos(\omega_c t + \varphi(t)), \end{aligned} \quad (3)$$

其中,

$$e_b(t) = V_s(t) \cos \theta + V_b(t),$$

$$e_c(t) = V_s(t) \sin \theta + V_c(t).$$

则 $V(t)$ 的包络和相位分别为

$$e(t) = \sqrt{e_b^2(t) + e_c^2(t)} \quad (e \geq 0),$$

$$\varphi(t) = \arctan(e_b(t)/e_c(t)) \quad (0 \leq \varphi \leq 2\pi).$$

下面重点讨论 $V(t)$ 的包络和相位的统计特性. 如果 θ 值给定, 则 e_b 和 e_c 是相互独立的高斯随机变量, 有 $E[e_b] = V_s(t) \cos \theta$, $E[e_c] = V_s(t) \sin \theta$, $\sigma_n^2 = \sigma_b^2 = \sigma_c^2$. 于是, 在给定 θ 条件下, 通过求取 e_b 和 e_c 的联合概率密度函数, 再根据 e_b , e_c 与 e 和 φ 之间的随机变量关系, 则可以得到 e 的边际分布为

$$\begin{aligned} f(e/\theta) &= \frac{e}{2\pi\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{e^2 + V_s^2(t)}{2\sigma_n^2}\right) \\ &\quad \times \int_0^{2\pi} \exp\left(\frac{V_s(t)e}{\sigma_n^2} \cos(\theta - \varphi)\right) d\varphi. \end{aligned} \quad (4)$$

由于

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(x \cos \varphi) d\varphi = I_0(x),$$

则

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left(\frac{V_s(t)e}{\sigma_n^2} \cos(\theta - \varphi)\right) d\varphi \\ &= I_0\left(\frac{V_s(t)e}{\sigma_n^2}\right), \end{aligned}$$

$I_0(x)$ 为第一类零阶修正贝塞尔函数. 当 $x \geq 0$ 时, $I_0(x)$ 单调递增, 且有 $I_0(0) = 1$. 由于 $f(e/\theta)$ 与 θ 值无关, 则 $V(t)$ 的包络 e 的概率密度函数为

$$f(e) = f(e/\theta) = \frac{e}{\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{e^2 + V_s^2(t)}{2\sigma_n^2}\right) I_0\left(\frac{V_s(t)e}{\sigma_n^2}\right), \quad (5)$$

密度函数(5)式称为莱斯(Rice)分布. 从(5)式可以看出, 夹杂噪声的脉冲激光回波信号波形并不一定属于高斯分布, 它因信噪比的不同而有所变化. 当脉冲回波信号较弱, 即 $V_s(t) \rightarrow 0$ 时, 信噪比

$$SNR = \frac{V_s^2(t)}{2\sigma_n^2} \rightarrow 0,$$

有 $I_0(x) = 1$, 此时脉冲回波信号波形属于瑞利分布; 当脉冲回波信号较强, 即信噪比 SNR 很大, 有 $I_0(x) \approx \frac{\exp(x)}{\sqrt{2\pi x}}$, 此时脉冲回波信号波形在 $e \approx V_s(t)$ 附近近似服从高斯分布, 即

$$f(e) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left[-\frac{(e - V_s(t))^2}{2\sigma_n^2}\right]. \quad (6)$$

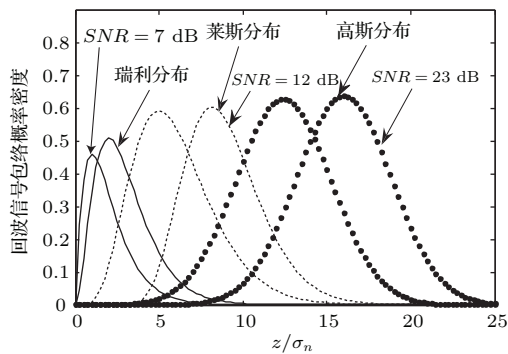


图2 不同信噪比下回波信号包络的概率密度分布
Fig. 2. Probability density distribution of echo signal envelope under different SNRs.

由此可见, 夹杂随机噪声的脉冲回波信号的包络分布与信噪比密切相关. 小信噪比时, $f(e)$ 趋近瑞利分布; 大信噪比时, $f(e)$ 接近高斯分布; 一般

情况为莱斯分布. 图2给出了不同信噪比情况下这三种分布的概率密度特性曲线. 从图2可直观地看出: 小信噪比时, 波形上升沿陡峭, 下降沿较缓, 呈现不对称波形; 大信噪比时, 波形基本上对称分布, 波形稳定; 一般情况下, 波形介于两者之间, 稍有变化. 信噪比对波形的影响, 将直接导致测距离散数据的不同分布.

2.2 实验研究

2.2.1 实验平台搭建

机载多脉冲激光系统在探测远距弱小目标时, 由于大气衰减作用和背景辐射的干扰, 回波信号变得微弱. 雪崩光电二极管 (APD) 具有灵敏度高、响应时间快、体积小、可靠性高以及较高的内部增益, 可将微弱光信号显著放大, 是比较合适的脉冲激光探测器 [13], 实验中采用 PerkinElmer 公司生产的 C30950EH 型 APD 探测器.

选择夜间开阔跑道为实验地点, 大气能见度为 20 km, 以 1000 m 处的一个白板为测试目标, 白板的半球反射率 $\rho \approx 92\%$. 基于恒比定时时刻鉴定方法和飞行时间测量原理, 搭建实验系统平台如图3所示.

该系统包括激光发射单元、时间测量单元、激光接收单元、时刻鉴别和数据处理单元五个部分. 实验采用频率为 1 kHz、脉冲能量为 2 mJ、脉宽为 50 ns、发散角为 5 mrad、输出波长为 1640 nm 的激光器作为发射光源, 输出功率通过设置驱动电路中的参数进行调节, 使接收信号信噪比可根据实验要求而定. 测距时, 由现场可编程门阵列产生脉冲, 触发激光驱动电路发出激光脉冲, 同时将反馈驱动

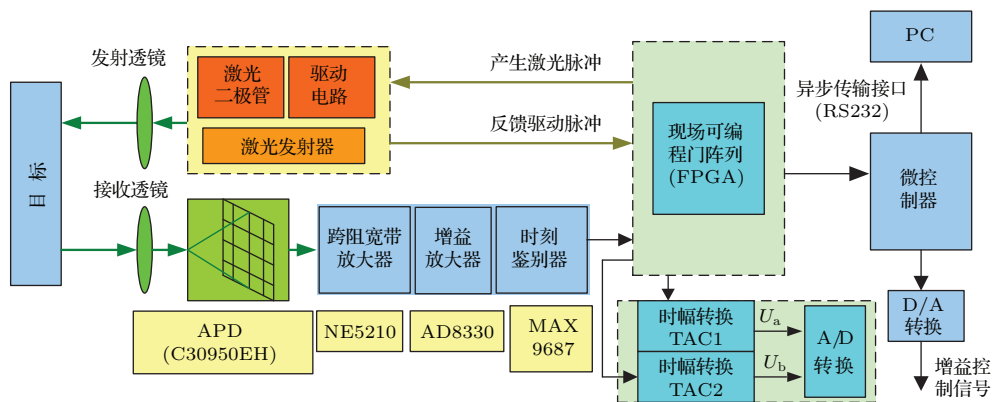


图3 测距实验系统框图

Fig. 3. The system chart of ranging experiment.

脉冲作为主波. 激光脉冲经发射系统发出, 接收系统接收经目标反射的回波信号, 经过恒比定时时刻鉴别方法的处理, 输出回波脉冲. 时间测量电路对反馈驱动脉冲和回波脉冲之间时间间隔进行测量, 最后再由程序算出距离, 输出到上位PC中, 并根据距离值控制D/A 输出增益控制信号.

2.2.2 实验数据处理与分析

当输出峰值功率为20 kW时, 脉冲激光探测系统的信噪比为19.2, 脉冲信号回波信号波形如图4所示. 从图4可见: 回波信号夹杂着大量的噪声; 在0.2 μs左右, 回波信号出现第一次峰值, 这是由于大气的后向散射作用造成的; 直到3.3 μs左右, 探测器接收到目标反射信号.

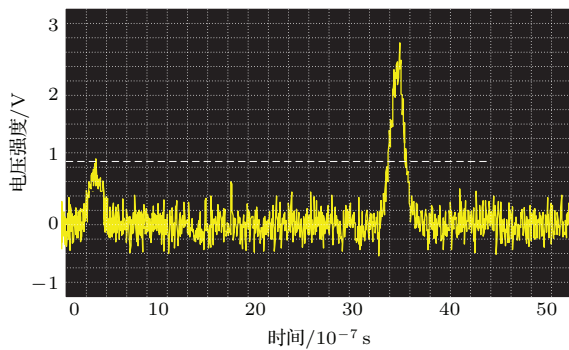


图4 脉冲回波与噪声信号实验图

Fig. 4. The diagram of pulse echo and noise signals.

为了尽可能地减小环境干扰和探测器噪声的影响, 在大量测距数据分析的基础上, 将阈值电平设置为950 mV, 此时脉冲激光探测系统的工作状态较为理想, 可以抑制大量噪声信号, 阈噪比为4.5, 错测率和虚警率几乎都接近0. 在理想状态下, 对测试目标进行800次定点测距. 为减小拟合波形与实际接收信号波形的误差, 采用非线性最小二乘法进行数据拟合, 该方法通过最小化拟合波形和接收信号波形在各点的余量的平方和而得到最优化的参数值. 根据最小二乘法曲线拟合原理, 统计实测数据的离散分布图, 并做归一化处理. 在高信噪比条件下, 图5给出了原实测数据的统计分布, 纵坐标为800次测量落在横轴距离上的频率. 经过数据处理, 图6中测距数据的离散分布与正态分布拟合较好, 拟合度达到了99.75%.

在上述信噪比的基础上, 同样对1000 m处的目标进行测距, 通过减小激光发射单元的激光输出功率, 改变脉冲激光系统探测目标的信噪比, 观察800次定点测距的统计特性. 图6(a)—(d)给出

了测距数据的统计特性随信噪比的离散分布规律. 随信噪比的降低, 测距数据分散度以及误差都在增大.

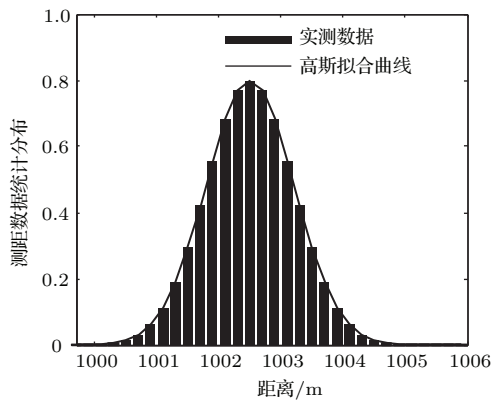
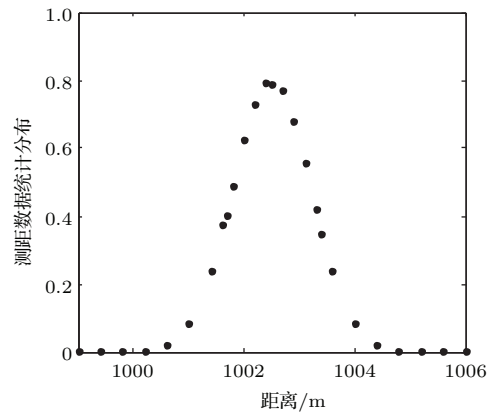


图5 测距数据与数据处理后的统计分布

Fig. 5. The statistical distribution of ranging data and processed data.

当信噪比较大时, 回波能量信号受噪声的干扰较小, 尤其是信号波形上半部分较为稳定, 前沿半高度决定的时刻偏移范围较小. 因此, 从图6(a)中数据分布形式来看, 探测系统检测到的有效测距数据概率很高, 测距数据相对误差也较小, 离散数据较好地符合高斯分布. 继续减小信噪比, 结果如图6(b)所示: 此时检测到的有效测距数据的概率相对减小; 波形前沿半高度对应的时刻位置受到噪声信号一定概率的干扰, 回波信号波形逐渐偏离高斯分布, 出现上升沿快、下降沿缓的趋势; 由于波形开始呈现不对称分布, 上升沿变快, 所以波形半高度对应的大部分时刻位置比较集中, 某些时刻较为分散, 反映在测距数据上则近似于莱斯分布.

继续降低信噪比, 结果如图6(c)所示: 检测到有效数据的概率大幅降低, 但测距数据密集度升高, 整体相对误差增大, 此时, 回波信号大部分淹没在噪声中, 噪声成为影响测距数据分布的主要因素; 由于信号波形已经完全失去对称性, 上升沿变

得陡峭, 下降沿十分缓慢; 波形半高度时刻整体比较集中外, 其他小部分还受到噪声的影响而出现严

重偏移现象, 测距数据误差较大, 延时效果明显, 使得数据统计特性逐渐由莱斯分布演变成瑞利分布.

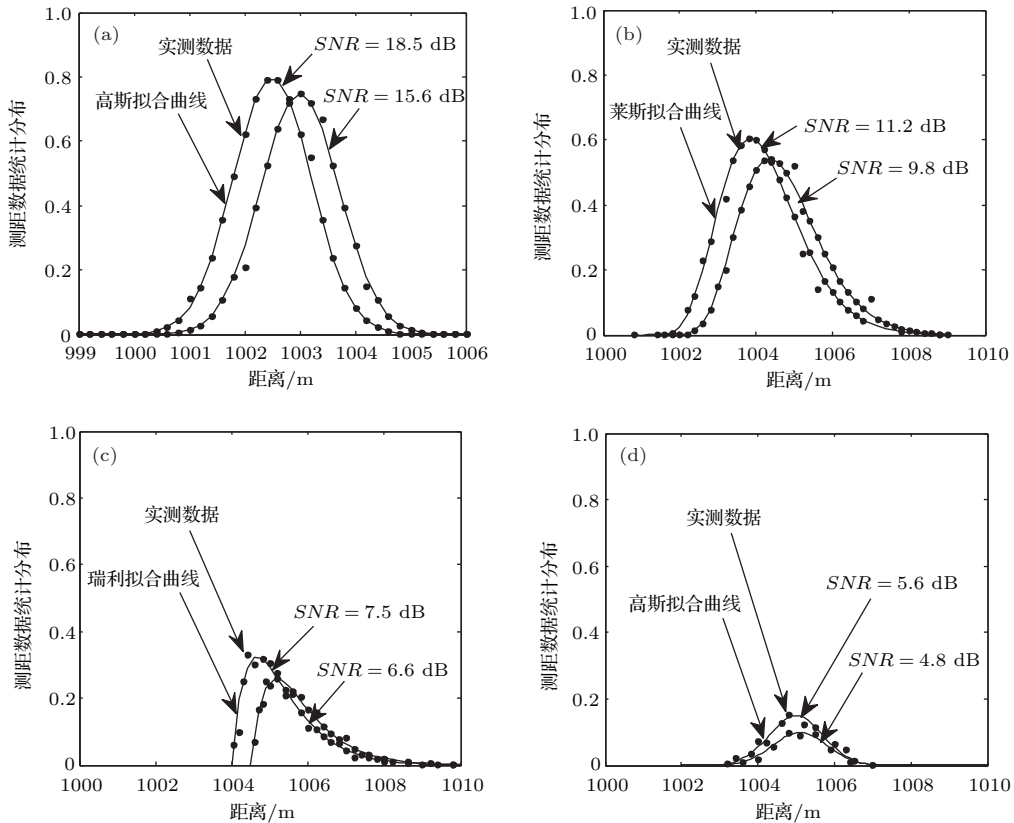


图6 不同信噪比下测距数据的离散分布 (a) $SNR = 15.6, 18.5$ dB; (b) $SNR = 9.8, 11.2$ dB; (c) $SNR = 6.6, 7.5$ dB; (d) $SNR = 4.8, 5.6$ dB

Fig. 6. The discrete distribution of ranging data under different SNRs: (a) $SNR = 15.6, 18.5$ dB; (b) $SNR = 9.8, 11.2$ dB; (c) $SNR = 6.6, 7.5$ dB; (d) $SNR = 4.8, 5.6$ dB.

如图6(d)所示, 当信噪比接近阈噪比时, 测距数据密集度虽然较高, 但由于大部分回波信号几乎淹没于噪声当中, 漏检率升高, 有效测距数据的检测概率大幅降低, 机载单脉冲激光系统已经不能担负测距任务, 但对于高重复频率脉冲激光系统可以提高测距的概率. 由于回波信号峰值本来较低, 大多数信号波形上升沿和下降沿区别不大, 且波形半高度所对应的时刻差异很小, 测距数据再次呈现出高斯分布.

3 测距不确定度的量化分析

从图6测距数据的统计分布曲线中发现, 信噪比越低, 数据的密集度有所升高, 方差减小, 这并不能反映实际情况. 为了更好地描述测距结果, 引入测量不确定度的概念. 国家计量技术规范对测量不确定度定义为: 表征合理地赋予被测量之值的分散性, 与测量结果相联系的参数. 实际中以机

载平台进行的激光远距测量, 其测距结果原理上存在一定的检测概率, 即每次测距结果是以一定概率分散在某个区域内的许多个值. 在某种程度上, 测距不确定度不仅能够反映测距数据的密集度, 也能反映数据在这一密集程度上的置信区间和概率, 这很好地解决了单以“方差”为概念描述的不足.

根据实验获取的测距数据, 统计不同信噪比情况下测距数据的绝对误差分布, 结果如图7所示, 横坐标表示800次定点测距中获取的数据编号, 纵坐标表示实验数据与目标距离的绝对误差.

从图7可见, 随着信噪比的减小, 数据平均测距误差呈现增大的趋势, 同时, 系统检测到有效数据的概率下降, 导致有效测距数据个数大幅度减少, 当信噪比逐渐接近阈噪比时, 误差数据的分散性有所降低, 这与前面的实验分析一致. 当评价机载多脉冲激光测距系统的性能时, 需要结合不确定度原理, 可将以“方差”为概念的评价指标推广为分

布区间概率评价指标. 不确定度可用分布区间概率 $(a, b)|\bar{p}$ 进行量化表示, 其中 a, b 分别表示置信区间误差下、上边界, \bar{p} 表示置信区间内所有数据的平均概率, 它不同于置信概率, 在激光测距过程中, \bar{p} 表

示落在置信区间中每个误差值对应的测距数据的平均检测概率. 在图 7 的误差统计基础上, 计算出不同信噪比下置信概率为 95% 的置信区间以及平均检测概率, 如表 1 所列.

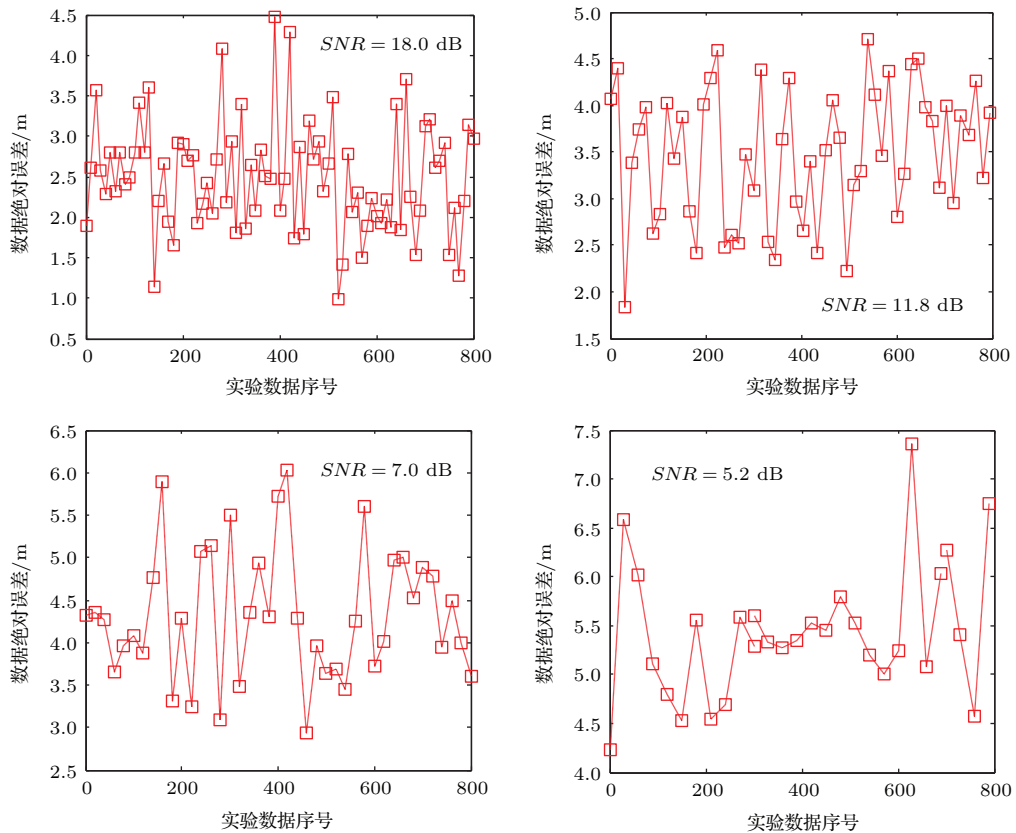


图 7 不同信噪比下测距数据绝对误差分布曲线

Fig. 7. The distribution curve of ranging absolute error under different SNRs.

表 1 不同信噪比下的误差分布区间概率

Table 1. The distribution interval probability of error under different SNRs.

| SNR/dB | 分布区间概率 $(a, b) \bar{p}$ | SNR/dB | 分布区间概率 $(a, b) \bar{p}$ |
|--------|-------------------------|--------|-------------------------|
| 4.8 | (4.5, 6.2) 0.12 | 10.5 | (3.4, 5.4) 0.45 |
| 5.2 | (4.2, 6.0) 0.15 | 11.4 | (3.2, 5.3) 0.44 |
| 6.8 | (4.5, 6.4) 0.19 | 13.3 | (2.6, 4.7) 0.51 |
| 7.5 | (4.0, 5.9) 0.21 | 15.2 | (2.3, 4.6) 0.54 |
| 8.5 | (3.8, 5.8) 0.35 | 16.5 | (1.9, 4.3) 0.54 |
| 9.6 | (3.4, 5.5) 0.39 | 18.2 | (1.4, 3.9) 0.57 |

从表 1 统计结果可以看出, 置信概率为 95% 的测距误差置信区间随着信噪比的降低, 除了在大信噪比时变化不明显外, 总体上呈现单调递减的变化规律, 且平均检测概率也是单调递减的, 这再次验证了前面的实验分析. 若要对本实验的多脉冲激光系统的测距性能进行评价, 就不能单从传统的“方差”指标去评价, 也不能仅靠置信区间越小或信

噪比越高指标去评价. 信噪比越高, 对系统性能的要求也越高. 通过综合考虑, 在信噪比尽量高的前提下, 还需要把误差置信区间越小与平均检测概率越高指标结合起来评价. 就表 1 而言, 信噪比为 15.2 dB, 误差置信区间 (2.4, 4.2) 所对应的平均检测概率为 0.54 时, 激光测距系统具有较好的工作状态, 掌握了此信噪比下的误差规律后, 可通过技术

手段进行误差消除, 实现更准确的多脉冲激光测距测量.

4 结 论

本文从机载多脉冲激光测距这一概率事件出发, 建立理论分析模型, 研究了脉冲测距回波信号的波形特性, 得到了回波信号包络概率密度分布函数, 且在不同信噪比下, 具有不同的分布特性. 搭建实验平台, 根据恒比定时时刻鉴别方法获得大量实测数据, 通过对测距数据的深入分析, 数据呈现出与理论分析一致的结论, 这验证了本文的理论模型. 针对以“方差”定义的测距精度不适用的情况, 提出了不确定度这一新的客观描述测距精度的概念. 结合不确定度原理, 在不确定度概念的具体化和量化基础上, 对传统激光测距性能评价方法进行了创新, 较好地解决了传统评价指标的单一性以及不合理性. 相比传统方法, 该方法能够以更客观性和准确性来评价激光测距性能, 也可根据实验结论进行室内模拟测试, 为机载多脉冲激光测距以及机载光电系统的性能评估提供了一定的参考意义.

参考文献

[1] Zhang Y C, Wu J Z, Li Y Q, Jin L, Ma J, Wang L R, Zhao Y T, Xiao L T, Jia S T 2012 *Chin. Phys. B* **21**

- 113701
- [2] Wang G C, Yan S H, Yang J, Lin C B, Yang D X, Zou P F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 070601 (in Chinese) [王国超, 颜树华, 杨俊, 林存宝, 杨东兴, 邹鹏飞 2013 物理学报 **62** 070601]
- [3] Cui M, Zeitouny M G, Bhattacharya N, van den Berg S A, Urbach H P 2011 *Opt. Express* **19** 6549
- [4] Hei K F, Yu J L, Wang J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 100602 (in Chinese) [黑克非, 于晋龙, 王菊 2014 物理学报 **63** 100602]
- [5] Shi Z Y, Pan X S, Zhang Q 2014 *Opt. Precision Eng.* **22** 020252 (in Chinese) [施智勇, 潘晓声, 张谦 2014 光学精密工程 **22** 020252]
- [6] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, Newbury N R 2009 *Nat. Photon.* **3** 351
- [7] Johnson S E, Nichols T L, Gatt P, Klausutis T J 2004 *Proc. SPIE* **5412** 72
- [8] Steinvall O 2000 *Appl. Opt.* **39** 4381
- [9] Amann M C, Bosch T, Lescure M, Myllyla R, Rioux M 2001 *Opt. Eng.* **40** 10
- [10] Zhang C M, Huang W J, Zhao B C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5479 (in Chinese) [张淳民, 黄伟健, 赵葆常 2010 物理学报 **59** 5479]
- [11] Jiang H J, Lai J C, Wang C Y 2011 *Chin. J. Lasers* **38** 0514001 (in Chinese) [姜海娇, 来建成, 王春勇 2011 中国激光 **38** 0514001]
- [12] Wang R D, Tian W, Wang P 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 1112001 (in Chinese) [王汝冬, 田伟, 王平 2012 光学学报 **32** 1112001]
- [13] Kang Y M, Liu H D, Morse M, Paniccia M J, Zadka M, Litski S, Sarid G, Pauchard A, Kuo Y H, Chen H W, Zaoui W S, Bowers J E, Beling A, McIntosh D C, Zheng X G, Campbell J C 2008 *Nat. Photon.* **3** 59

Ranging characteristic and uncertainty of airborne multi-pulse laser*

Kou Tian^{1)†} Wang Hai-Yan¹⁾ Wang Fang¹⁾ Wu Xue-Ming¹⁾
Wang Ling¹⁾ Xu Qiang²⁾

1) (*Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China*)

2) (*Unit No. 95949 of PLA, Cangzhou 061000, China*)

(Received 26 December 2014; revised manuscript received 21 January 2015)

Abstract

Under the special environment of airborne platform, the theoretical model is built based on probability characteristic of laser ranging, and the probability density distribution functions of pulse-echo signal envelope under different signal-to-noise ratios (SNRs) are obtained. The theoretical results show that the decrease of SNR causes different distributions of ranging data through echo wave characteristic. The experimental data present Gauss distribution with larger SNR, or Rayleigh distribution with poor SNR, or Rice distribution with general condition. According to the constant-ratio timing method, experimental results verify the rationality of theoretical model under a number of ranging data. When the ranging accuracy defined by variance is not applicable, the concept of uncertainty of measurement is introduced. Combined with the theory of uncertainty, a new method of evaluating airborne laser ranging performance is put forward. This method could overcome the unity and irrationality of traditional evaluating method, and meanwhile, it could provide an important reference for evaluating and testing airborne optoelectronic system performance.

Keywords: multi-pulse laser, constant-ratio timing method, signal-noise ratio, uncertainty

PACS: 06.20.Dk, 07.05.Kf, 42.68.Sq, 42.55.Px

DOI: [10.7498/aps.64.120601](https://doi.org/10.7498/aps.64.120601)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61172083).

† Corresponding author. E-mail: shanxiakkt@163.com