

# 星载激光测高仪距离参数地面标定方法

陈露,高志山\*,袁群,殷慧敏,朱丹,刘威剑  
(南京理工大学 电子工程与光电技术学院,江苏 南京 210094)

**摘要:**星载激光测高仪接收系统通过收集地表反射的回波信号,反演卫星与地表的高度。本文提出一种回波模拟光源方法,产生延时量可调的激光主波和回波周期脉冲信号作为接收系统的检校输入源,对星载激光测高仪距离参数进行地面标定。首先,采用主波与回波光电探测器互换的测量方法,利用频率计数器对回波模拟光源的延时量设定值进行精确测量,测量方法误差为 113 ps。然后,通过比对回波模拟光源调制的延时量设定值和接收系统测试获取的延时量实测值,实现对测高误差的标定和校正。研制了一套回波模拟光源系统,通过 3 335 640.9 ~ 3 669 205.0 ns 的延时量调制,实现对 500 ~ 550 km 高度的精确模拟,模拟延时信号的抖动量为 34.5 ps,延时偏差小于 118 ps,为百千米级星载激光测高仪提供了高程误差优于 6 cm 的地面检校能力。

**关键词:**星载激光测高;地面标定;延时量;高程误差

**中图分类号:** TM935.45; TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20191204.0896

## Ground calibration method for distance parameters of satellite-borne laser altimeter

CHEN Lu, GAO Zhi-shan\*, YUAN Qun, YIN Hui-min, ZHU Dan, LIU Wei-jian  
(*Institute of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of  
Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: zhishgao@njust.edu.cn*

**Abstract:** Satellite-borne laser altimeter measures the distance between a satellite and the earth through processing a laser echo signal collected by its receiving module. A laser echo simulation model for the ground-based distance parameter calibration of satellite-borne laser altimeter is proposed, in which the emission laser pulse and the returned laser pulse with an adjustable time-delay are generated. First, the time-delay value set in the laser echo simulation system was precisely measured by swapping two photodetectors and using a frequency counter, and the measurement error was 113 ps. The calibration of the elevation error is realized by comparing the time-delay set value and the time-delay value obtained in the receiving system. A laser echo simulation system is developed that offers distance simulation ability from 500 km to 550 km with a jitter of

收稿日期:2018-10-15;修订日期:2018-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助(No. 61505080)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61505080)

34.5 ps by setting the periodic time-delay from 3 335 640.9 ns to 3 669 205.0 ns. The time-delay accuracy of the laser echo simulation system for the satellite-borne laser altimeter is better than 118 ps and the system can provide a calibration capability better than 6 cm in the range of hundreds of kilometers.

**Key words:** satellite laser altimeter; ground calibration; time-delay; elevation error

## 1 引言

卫星激光测高具有方向性好、测距精度高等特点,广泛用于深空探测和地球科学领域。其中,脉冲式激光测高法因结构简单、功耗低、测距范围大而得到了广泛应用。具备回波记录功能的星载激光测高仪是一种以激光作为测量光源的主动式遥感设备<sup>[1-2]</sup>,通过对接收子系统所收集和记录的脉冲回波数据进行处理和分析,可以精确计算激光脉冲在卫星和地面之间的渡越时间(Time of Flight, TOF),反演出卫星和地表的距离<sup>[3-4]</sup>。

由于在轨几何检校耗费高,耗时长,很容易受天气条件等限制,因此,需要一种地面标定方法对星载激光测高仪的性能进行测试和评价。接收子系统是星载激光测高仪的核心部件,通过模拟激光在大气回波的传输过程,提供远距离的虚拟目标,可以实现对接收子系统大测程指标的精确标定。上述标定原理简明直观,但对于百千米级距

离参数的标定方法与设备,国内外均未见相关报道。

本文针对某星载测高仪的测高应用(500~550 km),面向其接收子系统6 cm的测距标定误差,即400 ps时间标定误差的需求,提出一种用于星载激光测高仪距离参数地面标定的模拟光源方法,并对影响标定误差的主要指标——模拟光信号延时量的误差和延时抖动进行分析和实验验证。

## 2 回波模拟光源法

### 2.1 检校原理与流程

对星载激光测高仪距离参数进行地面标定的核心思想是利用回波模拟光源产生延时量已知的激光主波和回波周期脉冲模拟光信号,作为输入提供给激光测高仪的接收子系统,其标定原理框图如图1所示。模拟光源产生延时量可调制的激光主波和激光回波周期脉冲信号,以毫秒级长延

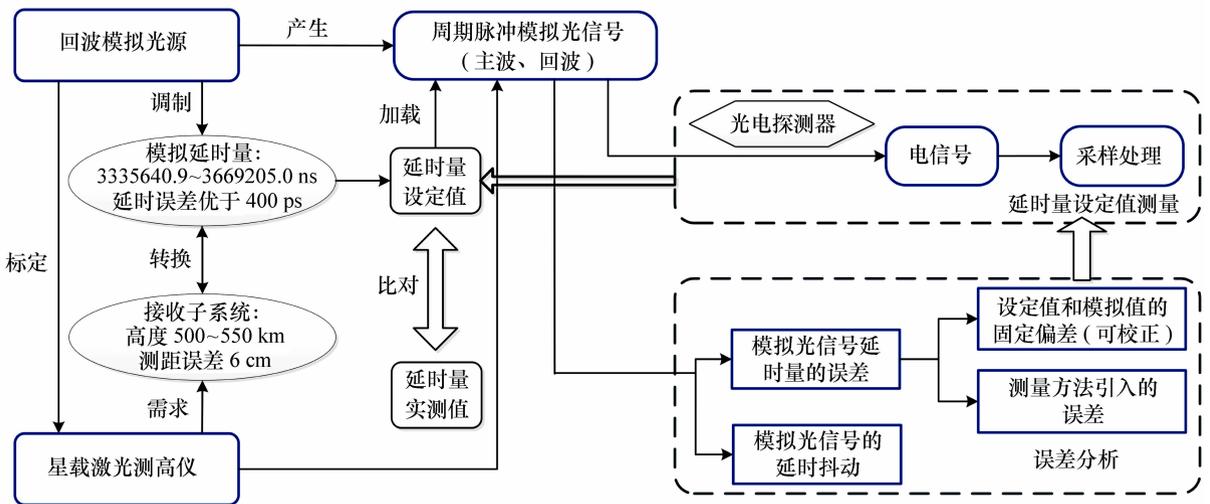


图1 星载激光测高仪距离参数地面标定方法原理图

Fig. 1 Schematic of the ground calibration method for distance parameter of satellite laser altimeter

时量模拟数百千米级距离,通过比对星载激光测高仪接收子系统测试模拟光源获取的延时量实测值和模拟光源调制的模拟延时量实现对激光测高仪距离参数的标定。标定方法的精度主要受模拟光信号延时量的误差和延时抖动的影响。采用更高精度的方法测量调制的模拟延时量是完成标定的首要条件。模拟延时量的误差包括对模拟延时量设定值测量时测量方法带来的误差,及延时量设定值和模拟值的固定偏差。在测量获取固定偏差后,可以通过对产生模拟延时信号的硬件电路进行调整,直接校正固定偏差。因此,模拟光信号延时量设定值的测量方法十分重要,并与回波模拟光源光信号的延时抖动共同决定了星载激光测高仪距离参数的标定误差。

## 2.2 电信号定时方法原理分析

常用的电信号延时量测量方法有前沿判别法、恒比定时阈值法和全波形法等<sup>[5]</sup>。星载激光测高仪工作时,激光主波为高斯波形,激光回波经探测区域内地表形状、地表粗糙度和反射率等地形、地物信息的调制后,波形将发生不同程度的展宽和畸变<sup>[6-7]</sup>。针对实际回波波形的上述特征,对波形进行分析、处理时常采用全波形法,存储采样信号后进行分析处理获取延时量数据。对于激光脉冲波形而言,形心等同质心,波形形心表达式如下<sup>[8]</sup>:

$$C = \frac{\int f(t,y) dl}{\int dl}, \quad (1)$$

式中: $f(t,y)$ 为回波脉冲信号函数, $t$ 为时间位置, $y$ 为幅值信息; $l$ 为高斯波形与时间轴围成的平面区域。

恒比定时阈值法是前沿判别法的改进,其可以根据信号幅度动态调整阈值电平大小,从而避免信号幅度变化引起的时间漂移<sup>[9]</sup>。

星载激光测高仪距离参数的地面标定系统,标定的物理量是激光测高仪的主、回波之间长延时量,不涉及回波波形畸变时计时基准的求解方法,故采用可以溯源的延时方法,产生已知长延时量的标准主、回波波形,标定激光测高仪的信号处理模块,来评定其计时误差。回波模拟光源作为

星载激光测高仪的地面标定系统,产生的模拟主、回波均为理想的高斯波形,可以取信号幅度的50%作为触发电平阈值,采用频率计数器作为测量设备,通过恒比定时阈值法实时测量延时量数据。

图2仿真了脉宽为10 ns,延时为50 ns的主、回波高斯脉冲信号,分别求取两脉冲上升沿幅值的50%位置,坐标分别为 $(-3.723, 0.0631)$ , $(46.277, 0.0631)$ ,延时量记为 $\Delta t_1$ ;全波形法获取的理想高斯波形的形心位置坐标分别为 $(0, 0.0446)$ , $(50, 0.0446)$ ,延时量记为 $\Delta t_2$ 。对于高斯波形的脉冲信号,两种方法求取的延时量相等,且不受延时量长短的影响。

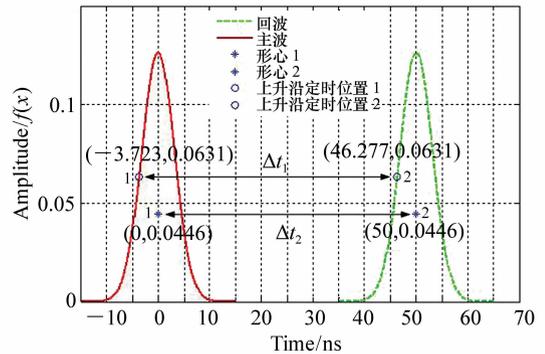


图2 电信号延时量的两种测量方法结果对比  
Fig. 2 Comparison of electrical signal time-delay values obtained by two measurement methods

## 2.3 电信号定时方法误差对比

采用回波模拟光源标定星载激光测高仪距离参数,其距离的标定误差可以转化为模拟光信号延时量的误差和模拟光信号的延时抖动。模拟光信号延时量的误差与加载在模拟主波和回波光信号中延时量的单次精密测量紧密相关。而延时抖动则需测量周期脉冲模拟光信号在若干个周期内的延时量<sup>[10-12]</sup>,并分析延时量的变化情况。

时间信号的高精度测量仪器主要有示波器和频率计数器两种,均需外接高稳源。其中,示波器存储输出的是波形数据,对其再处理可获得延时量数据,频率计数器可直接存储输出延时量数据。

对于某个设定的延时量,回波模拟光源周期性产生脉冲主波和回波信号,延时抖动是对若干

个周期信号延时量的统计结果。因此,采用示波器作为测量仪器将会受到存储深度的限制。若选用高端示波器外接存储深度为1G点的选件,在测量3 ms的延时信号、采样134个周期时,采样率最大为2.49 GS/s,对应的时间分辨率最大为402 ps,已超出测量误差的要求,且测量模拟信号的延时抖动时,波形采样周期不应限于134个,这将进一步降低时间分辨率。考虑到对于本文待测的长延时周期脉冲信号,示波器受存储深度的限制,且数据处理速度慢、价格昂贵,故选用频率计数器作为电信号延时量的采样设备。

采用频率计数器进行延时量测量,其误差 $u$ 主要包括时基稳定性带来的测量误差分量 $u_1$ 以及波形信号采样间隔引入的测量误差分量<sup>[10-11]</sup>。其中,采样间隔测量误差分量包括横向采样(时间)的误差分量 $u_2$ 与垂直采样(电压)的误差分量 $u_3$ 。采用频率计数器进行两通道时间采样时还包括两通道间的压摆率引入的测量误差分量 $u_4$ <sup>[13]</sup>。其中:

$$u_1 = s \times \Delta t, \quad (2)$$

式中, $s$ 为时基稳定性; $\Delta t$ 为延时量。

$$u_3 = \frac{R}{A} \times w, \quad (3)$$

式中, $R$ 为频率计数器测量电压的分辨率; $A$ 为光电探测器将光信号转换为电信号的上升沿宽度; $w$ 为光电探测器将光信号转换为电信号的上升沿宽度。

以均方根方法对测量误差各分量进行合成,对于垂直采样误差的分量需要考虑主波和回波双通道的探测影响,合成测量误差为:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + 2 \times u_3^2 + u_4^2}. \quad (4)$$

采样信号以10 ns脉宽的高斯脉冲信号、3 ms模拟延时为例,采样设备选用外接氢钟的Agilent 53230A频率计。外接氢钟的频率计稳定度 $s = 5 \times 10^{-13}$ ,频率计测量电压分辨率 $R = 2.5$  mV,光电探测器将光信号转换为电信号的最大电压幅值 $A = 1.5$  V,光电探测器将光信号转换为电信号的上升沿宽度 $w = 10$  ns。横向采样(时间)的误差分量 $u_2$ 与压摆率引入的误差分量 $u_4$ 为频率计数器技术资料中的对应参数<sup>[13]</sup>。表1为测量电信号延时量的误差各分量值及合成测量误差。

表1 频率计数器测量误差分析(单位:ps)

Tab.1 Measurement error analysis of frequency counter( Unit: ps)

频率计数器(外接氢钟)	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u$
误差	0.001 5	100	16.7	50	113

测量误差分析结果如下:(1)在进行高精度时间间隔采样时,频率计数器外接高稳定性的氢钟、铷钟、铯钟等作为时基,时基引入的不确定分量可以忽略不计。(2)对于上升沿时间很短的信号,时间测量误差主要由横向采样(时间)分辨率决定。

综合以上两节的分析,对于长延时的理想高斯脉冲信号,采用高性能频率计数器外接氢钟的采样设备,选取脉冲上升沿幅度的50%作为电平阈值,进行脉冲信号的采样和处理,得到模拟光信号延时量的测量误差为113 ps。

## 2.4 高精度光信号延时测量方法

延时量的直接测量对象是被调制加载于两路

时序可控的周期脉冲模拟光信号中的延时量,但使用频率计数器无法直接测量主波和回波光信号。被测量是回波模拟光源输出的光信号,而频率计数器只可测量电信号,因此,必须将主波光信号和回波光信号分别经光电探测器转换为两路电信号才能进行延时量测量。但光电探测器将被测光信号转换为可测电信号时会存在光电转换延时,两个光电探测器的差异会导致主波和回波信号的光电转换延时量不一致,上述光电转化误差使得实测的延时量与待测的光信号延时量之间存在偏差。根据主波和回波模拟光信号的光电转换特性,本文提出了一种基于频率计数器的主波与回波光探测器互换的测量方法,将两个光电探

测器交换前后的延时量测量值进行平均,从而消除不同光电探测器间差异对模拟光信号延时量测

量结果的影响。流程如图 3 所示。

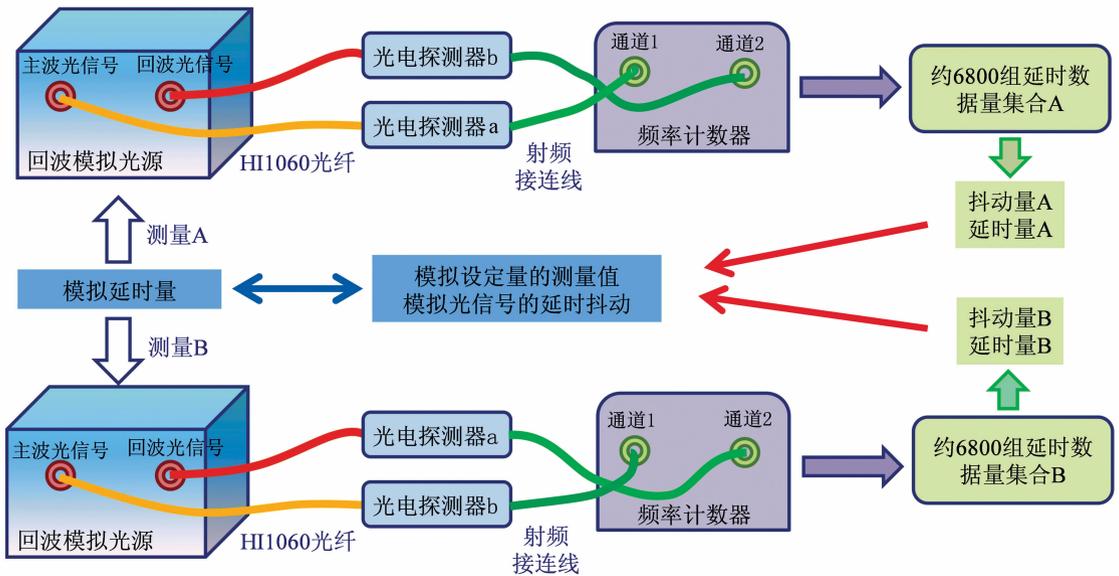


图 3 主波与回波光探测器互换的高精度延时测量方法流程

Fig. 3 Measurement procedure of the time-delay between the emission laser pulse and the returned laser pulse by swapping two photodetectors

步骤如下:

(1) 主波光信号经光纤 a 输出接入光电探测器 a, 再经射频连接线 a 接入示波器, 调节主波光信号的输出功率满足电信号幅度为 1.5 V, 然后接入频率计数器的通道 1;

(2) 回波光信号经光纤 b 输出接入光电探测器 b, 再经射频连接线 b 接入示波器, 调节回波光信号的输出功率满足电信号幅度为 1.5 V, 然后接入频率计数器的通道 2;

(3) 触发电平选择上升沿信号幅度的 50%, 利用频率计数器采集并存储约 6 800 组延时量数据集合作为统计量;

(4) 完成光电探测器不交换的测量过程 A, 调换主、回波光信号和光电探测器及射频连接线的对应关系, 重复上述步骤, 完成测量过程 B;

(5) 分别计算两组延时量数据集合的标准差值和平均值, 将两个标准差中的最大值记作模拟光信号的延时抖动量。

对于测量过程 A, 主波光信号相对同步电信号的延时量, 记作  $T_{1A}$ , 回波光信号相对同步电信号的延时量, 记作  $T_{2A}$ , 则

$$T_{1A} = t_1 + t_a, \quad (5)$$

$$T_{2A} = t_2 + t_b, \quad (6)$$

其中,  $t_1$  表示主波电信号相对同步电信号的延时量,  $t_a$  表示光电探测器 a 的光电转换延时量;  $t_2$  表示回波电信号相对同步电信号的延时量,  $t_b$  表示光电探测器 b 的光电转换延时量。

将式(5)、(6)相减, 得到测量过程 A 中延时量数据集合的平均值, 记作  $\Delta T_A$ , 则

$$\Delta T_A = T_{1A} - T_{2A} = t_1 - t_2 + t_a - t_b. \quad (7)$$

对于测量过程 B, 主波光信号相对同步电信号的延时量, 记作  $T_{1B}$ , 回波光信号相对同步电信号的延时量, 记作  $T_{2B}$ , 则

$$T_{1B} = t_1 + t_b, \quad (8)$$

$$T_{2B} = t_2 + t_a. \quad (9)$$

将式(8)、(9)两式相减, 得到测量过程 B 中延时量数据集合的平均值, 记作  $\Delta T_B$ , 则

$$\Delta T_B = T_{1B} - T_{2B} = t_1 - t_2 + t_b - t_a. \quad (10)$$

将式(7)和式(10)相加再平均, 消除不同光电探测器间差异对模拟光信号延时量测量结果的影响, 即

$$\Delta t = \frac{\Delta T_A + \Delta T_B}{2} = t_1 - t_2, \quad (11)$$

其中,  $\Delta t$  为主、回波光信号的延时量, 该值作为模拟延时量的实际设定值。

在对回波模拟光源光信号延时量进行测量的过程中, 主要采用的仪器设备的性能参数如表 2 所示。

表 2 标定系统及测量设备主要性能指标

Tab. 2 Main performance indicators of calibration system and measurement equipment

回波模拟光源	中心波长: 1 064 nm 脉宽: 10 ~ 150 ns 重复频率: 1 Hz ~ 1 kHz 峰值功率: $10^{-8} \sim 10^{-4}$ W
光电探测器(型号 TIA-525)	光功率探测范围: $3.2 \times 10^{-5} \sim 3.2 \times 10^{-3}$ W 输出电压范围: 2 ~ 4 V 带宽(-3 dB): DC to 125 MHz
频率计数器(型号 53230A, 外接氢钟)	时基稳定度: $5 \times 10^{-13}$ 时间分辨率: 20 ps 时间测量分辨力误差: 100 ps 两通道间的压摆率误差: 50 ps

### 3 回波模拟光源系统

回波模拟光源系统的组成如图 4 所示, 可分为激光器延时驱动单元<sup>[14]</sup>、信号光模拟单元、延时量测量单元 3 个基本单元。

激光器延时驱动单元在同步电信号的触发下

产生星载激光测高仪的模拟发射信号用于模拟主波电信号, 模拟返回信号用于模拟回波电信号。两路电信号分别驱动两台中心波长为 1 064 nm 的 F-P 激光器产生光信号<sup>[15-16]</sup>, 通过可控的周期脉冲模拟光信号的延时量设定等效测高系统参考位置到照准目标之间的距离。

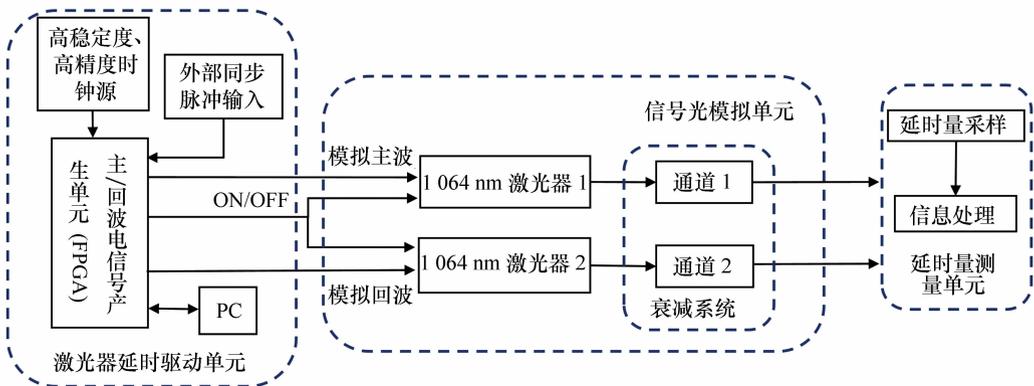


图 4 回波模拟光源系统原理图

Fig. 4 Framework of laser echo simulator

由于实际应用中, 搭载在卫星上的激光器不断向地表探测目标发射激光脉冲, 激光脉冲穿过大气层到达目标后, 产生较微弱的后向散射回

波<sup>[17]</sup>, 再次穿过大气层被测高仪接收子系统收集。为了模拟实际情况下的功率量级, 系统通过多级可调衰减方式模拟低峰值功率的微弱信号,

低至纳瓦量级,同时保证功率在可调范围内的高稳定性和高精度。图5为研制的回波模拟光源实物照片。



图5 回波模拟光源实物照片

Fig.5 Prototype of the laser echo simulator

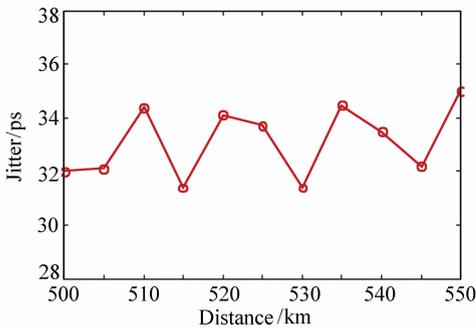


图6 模拟光信号的延时抖动测量结果

Fig.6 Time-delay jitter varying with the simulated distance

在研制的回波模拟光源系统中设置主波、回波光信号脉宽为 10 ns,重复频率为 100 Hz,并将峰值功率调至  $10^{-4}$  W。在模拟距离 500 ~ 550 km 内,以 5 km 的间隔,选择模拟光信号的模拟距离,对应的模拟延时量为 3 335 640.9 ~ 3 669 205.0 ns。利用图 3 所示的基于频率计数器的主波与回波光探测器互换的测量方法,对回波模拟光源的模拟延时量进行测量,获取延时量设定值和抖动值。图6为延时抖动的测量结

果,模拟光信号的延时抖动不超过 34.5 ps。2.3 节中所述,模拟光信号延时量的测量误差 113 ps。用均方根法对模拟光信号延时量的测量误差和模拟光信号的延时抖动进行合成,作为星载激光测高仪距离参数地面标定方法的偏差。因此,对于 500 ~ 550 km 的模拟距离,回波模拟光源法产生的延时偏差小于 118 ps。

## 4 结 论

针对星载测高仪 500 ~ 550 km 的测距应用,其接收子系统 400 ps 时间标定误差的需求,提出一种用于星载激光测高仪距离参数的地面标定模拟光源方法。模拟光源产生延时量可调的激光主波和激光回波周期脉冲信号,以毫秒级长延时量模拟数百千米级距离,通过比对星载激光测高仪接收子系统测试模拟光源获取的延时量实测值和模拟光源调制的延时量设定值实现对激光测高仪距离参数的标定。该标定方法的误差主要受模拟光源中光信号模拟延时量的误差和延时抖动的影响。对比分析了电信号延时量的常用测量方法,针对模拟光源中光信号加载毫秒级长模拟延时量精确测量的难题,提出了一种基于频率计数器的主波与回波通道光电探测器互换的测量方法,获取了光信号延时量的实际设定值,有效避免了测量过程中被测光信号转化为可测电信号时额外引入的光电转换误差,测量误差小于 113 ps。研制了一套星载激光测高仪距离参数地面标定的回波模拟光源系统,经过实验验证,对于 500 ~ 550 km 的模拟距离,模拟光信号的延时抖动为 34.5 ps,所以模拟光源产生的延时偏差小于 113 ps。本文为毫秒级范围、百皮秒级误差的延时信号的测量提供了可行方案,为百千米级星载激光测高仪的距离参数研制了标定设备,对我国在深空激光探测技术的应用具有一定的借鉴意义。

## 参考文献:

- [1] 周辉,李松,王良训,等. 噪声对星载激光测高仪测距误差的影响[J]. 红外与激光工程,2015,44(8):2256-2261. ZHOU H, LI S, WANG L X, et al. Influence of noise on range error for satellite laser altimeter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8):2256-2261. (in Chinese)
- [2] PALOJARVI P. Integrated electronic and optoelectronic circuits and devices for pulsed time-of-flight laser range-finding [D]. Oulu: University of Oulu, 2003.

- [3] 马跃,李松,阳凡林,等. 激光测高仪平顶高斯光束条件下的回波参数模型[J]. 中国激光,2015,42(4):0413002.  
MA Y,LI S,YANG F L,*et al.*. Model of waveform parameters for laser altimeter system under flattened Gaussian beams [J]. *Chinese Journal of Lasers*,2015,42(4):0413002. (in Chinese)
- [4] 孙杰,潘继飞. 高精度时间间隔测量方法综述[J]. 计算机测量与控制,2007,15(2):145-148.  
SUN J,PAN J F. Methods of high precision time-interval measurement[J]. *Computer Measurement & Control*,2007,15(2):145-148. (in Chinese)
- [5] 黄科,李松,马跃,等. 单光子激光测距的漂移误差理论模型及补偿方法[J]. 物理学报,2018,67(6):064205.  
HUANG K,LI S,MA Y,*et al.*. Theoretical model and correction method of range walk error for single-photon laser ranging [J]. *Acta Physica Sinica*,2018,67(6):064205. (in Chinese)
- [6] RINNE E,SHEPHERD A,MUIR A,*et al.*. A comparison of recent elevation change estimates of the Devon ice cap was measured by the ICESat and EnviSAT satellite altimeters[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,2011,49(6):1902-1910.
- [7] 马跃,李松,周辉,等. 系统参数对激光测高仪海洋测距和回波脉宽影响[J]. 光学精密工程,2013,21(3):813-820.  
MA Y,LI S,ZHOU H,*et al.*. Effect of system parameters on ranging and pulse width in ocean satellite laser altimeter system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,21(3):813-820. (in Chinese)
- [8] MUSS J D,AGUILAR-AMUCHASTEGUI N,MLADENOFF D J,*et al.*. Analysis of waveform Lidar data using shape-based metrics[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*,2013,10(1):106-110.
- [9] 程鹏飞. 大动态范围高精度激光测距关键技术研究[D]. 上海:中国科学院研究生院(上海技术物理研究所),2014.  
CHENG P F. Research of key technologies of wide dynamic range and high precision laser distance measurement[D]. Shanghai:Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences,2014. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 9317-2012 脉冲信号发生器通用规范[S]. 北京:中国标准出版社,2013.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 9317-2012 General specification for pulse signal generator[S]. Beijing:China Standard Press,2013. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. JJG 723-2008 时间间隔发生器检定规程[S]. 北京:中国标准出版社,2008.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. JJG 723-2008 Verification regulation of time interval generator[S]. Beijing:China Standard Press,2008. (in Chinese)
- [12] 国防科学技术委员会. GJB 2241.2-2006 脉冲激光测距仪性能试验方法 第2部分:静态最大测程、最小测程、测距精度和回波率试验[S]. 北京:中国标准出版社,2007.  
National Defense Science and Technology Commission. GJB 2241.2-2006 Test method of performance for pulsed laser rangefinders Part 2:static test of maximum ranging, minimum ranging, range accuracy and echo ratio[S]. Beijing:China Standard Press,2007. (in Chinese)
- [13] Agilent 53200A 系列射频/通用频率计数器/计时器技术资料[EB/OL]. 2010.  
Agilent 53200A Series RF and universal counter/timers product data[EB/OL]. 2010 Edition. (in Chinese)
- [14] 陈彦超,冯永革,张献兵. 用于半导体激光器的大电流纳秒级窄脉冲驱动电路[J]. 光学精密工程,2014,22(11):3145-3151.  
CHEN Y CH,FENG Y G,ZHANG X B. Large current nanosecond pulse generating circuit for driving semiconductor laser [J]. *Opt. Precision Eng.*,2014,22(11):3145-3151. (in Chinese)
- [15] 孟耀勇,张月清,武胜利. F-P 半导体激光放大器弱信号机制下的增益特性研究[J]. 发光学报,1991,12(4):318-324.  
MENG Y Y,ZHANG Y Q,WU SH L. Study on gain characteristic of fabry-perot type semiconductor laser amplifier under weak signal regime[J]. *Chinese Journal of Luminescence*,1991,12(4):318-324. (in Chinese)
- [16] 王立军,宁永强,秦莉,等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. 发光学报,2015,36(1):1-19.

WANG L J, NING Y Q, QIN L, *et al.*. Development of high power diode laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(1):1-19. (in Chinese)

[17] 李松, 周辉, 石岩, 等. 激光测高仪的回波信号理论模型[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1):33-39.

LI S, ZHOU H, SHI Y, *et al.*. Theoretical model for return signal of laser altimeter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1):33-39. (in Chinese)

#### 作者简介:



陈露(1992—),女,河南南阳人,博士生,主要从事光电仪器系统的设计、光纤传感技术方面的研究。E-mail: June\_0623@126.com



高志山(1966—),男,江苏淮安人,教授,博士生导师,主要从事光电仪器系统设计与测量、光机电算一体化集成与精密测量的研究。E-mail: zhishgao@njjust.edu.cn

## 向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国液晶学科和显示技术领域的综合性专业学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊、中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等 20 余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》以材料物理和化学、器件制备技术及器件物理、器件驱动与控制、成像技术与图像处理等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。其内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业学术期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》征集有关液晶聚合物、胶体等软物质材料和各类显示材料及制备方法、液晶物理、液晶非线性光学、生物液晶;液晶显示、等离子体显示、发光二极管显示、电致发光显示、场发射显示、3D 显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他新型显示等各类显示器件物理和制作技术;各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用;显示材料和器件的测试方法与技术;各类显示器件的应用;与显示相关的成像技术与图像处理等研究论文。

《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

地址:长春市东南湖大路 3888 号

《液晶与显示》编辑部

邮编:130033

电话:(0431)6176059

E-mail:yjyxs@126.com

国内统一刊号:CN 22-1259/04

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

国内邮发代号:12-203

国内定价:50 元/期

网 址:www.yjyxs.com