

## 用于机载激光测深系统的时间间隔测量模块\*

张新建, 臧华国, 崔雪梅, 贺岩, 陈卫标

(中国科学院上海光机所 新型激光技术与应用系统实验室, 上海 201800)

**摘要:**机载海洋激光测深系统不仅要求精确测量激光从海表的入射点到海底目标点之间的距离, 还要精确测定飞机到海表入射点之间的距离, 为水深数据的海浪校正而确定平均海平面以及波高。为此设计和研制了一高精度时间间隔测量器, 该单元基于专用时间数字转换芯片开发, 采用延迟线插入法技术, 双通道工作, 具有高时间分辨率(最高可达 250 ps)和高测量重复率的特性。给出硬件和软件设计方法以及单元的测试结果。

**关键词:**时间间隔测量; 延迟线插入法; 脉冲激光测距; 激光测深系统

**中图分类号:**TN249 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-20076(2005)02-0159-05

## Development of a time interval module for an airborne laser bathymetry\*

ZHANG Xin-jian, ZANG Hua-guo, CUI Xue-mei, HE Yan, CHEN Wei-biao

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China)

**Abstract:**In order to get the accurate depth of shallow water in a lidar bathymetry, it requires to measure the distance between sea surface and bottom, and the distance between airplane to sea surface. It is very helpful for the post-data process to get the mean ocean surface and the wave height. A high resolution time interval module is developed to get the high accurate distance between airplane to sea surface. The module is based on ASIC TDC chip with the technique of the delay-line interpolation. The module has two channels with a resolution as high as 250 ps, respectively. The hardware and software of the module and the testing results are presented.

**Key words:**Time interval module; Delay-line interpolation; Pulsed laser range finder; Laser bathymetry

### 0 引言

为了精确测量激光入射点处的水深  $D$ , 不仅要精确测量激光从海表的入射点到激光在海底的照射点

之间的距离  $r$ , 而且要精确测量激光从飞机上的发射点到海表入射点之间的斜距  $R$ , 利用所测得的斜距以及安装在飞机上的 GPS 和惯导所测得的飞机位置和姿态的数据进行海浪校正, 找到平均海平面和计算各

收稿日期: 2004-06-18; 修订日期: 2004-08-30

\* 基金项目: 国家 863 计划课题资助项目 (2001AA6130)

作者简介: 张新建 (1979-), 男, 安徽绩溪人, 硕士生, 研究方向为机载激光测深系统中时间间隔测量。

入射点的浪高  $h$ , 并以此来修正激光在海底照射点处的海深  $D = r \cos \phi + h$ 。另外, 激光从发射到入射再到海表的时间, 是机载测深系统的时间基准, 通过时延系统触发探测器的门控、数字化仪等。因此, 精确测量飞机到瞬时海面的距离  $R$  对测深系统是极其重要的。图 1 为机载激光测深系统的几何测量原理。

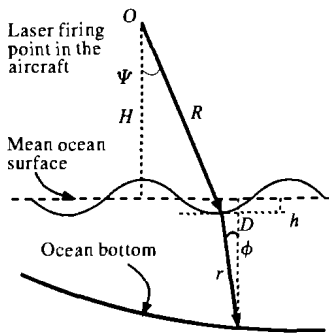


图 1 机载激光测深原理

Fig.1 Block diagram of airborne laser bathymetry

研制的机载激光测深系统采用共轴扫描的红外激光和绿光测量飞机到瞬时海面的距离<sup>[1]</sup>。双通道接收可以有效地获取海面信息, 提高海面测量概率; 根据水深精度测量的要求, 空中测距的精度至少要在 15 cm<sup>[2]</sup>; 为了提高水平分辨率, 激光的重复频率高达 1000 Hz, 相应地, 要求时间间隔测量单元具有处理高重复率的能力。

激光发射脉冲由一个高速 PIN 管接收后产生一个启动信号(Start), 回波信号采用高速雪崩光电二极管(APD)接收, 整形产生测距停止信号(Stop)。飞机到瞬时海面的距离由时间间隔单元测出 Start 和 Stop 之间的间隔转换得到。目前时间间隔的测量主要有三种方法: 模拟法、数字法和数字插入法。模拟法测量精度非常高, 但线性度差、测量范围小、受温度影响大, 在要求大测距范围的机载激光测距中不宜使用; 数字法线性度好、测量范围大, 但其测量精度不高, 可以通过多次测量取平均值来提高精度, 但无法应用于高重复率激光雷达等; 数字插入法是通过采用数字法结合各种不同的插入方法来实现精确测量的, 可以同时得到高单脉冲测量精度和高线性, 能够适应高速、大测量范围和高精度的应用领域<sup>[3]</sup>。利用 ACAM 公司的时间数字转化专用芯片 TDC\_GP1, 设计和开发了一套双

通道的、高重复频率时间间隔测量单元, 并介绍了该单元的测量结果。此单元的开发和利用将有利于提高机载激光测深的测量精度。

## 1 时间间隔测量模块的设计和实现

### 1.1 时间间隔模块的硬件组成

数字插入法是脉冲激光测距中精度最高的, 主要有延迟线插入法、模拟插入法和差频测相插入法三种<sup>[3]</sup>。TDC\_GP1 是由德国 ACAM 公司设计的一种高精度时间数字转换芯片, 采用的就是延迟线插入法技术, 具有一个共用的 Start 通道和两个测量通道(Stop1 和 Stop2), 两个通道的时间分辨率均为 250 ps。每个通道最多可响应 4 个 Stop 信号, 同一通道中各个触发脉冲信号之间能分辨的最小时间间隔为 15 ns, 测量范围为 3~7.6 μs<sup>[4]</sup>。图 2 为利用该芯片开发的时间间隔测量模块的组成结构。

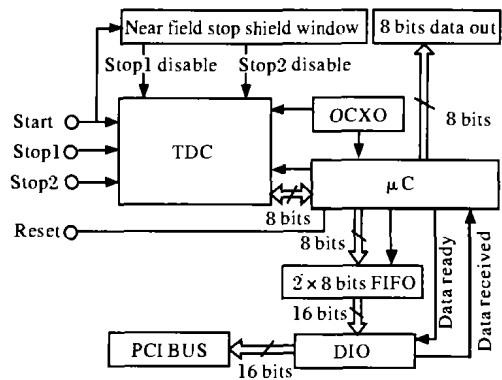


图 2 时间间隔测量模块的体系结构

Fig.2 Configuration of time interval module

模块以 TDC 芯片为核心, 利用单片机( $\mu C$ )进行控制和数据传输。 $\mu C$  通过内置程序与 TDC 芯片的寄存器之间进行通信。TDC 芯片有控制寄存器、结果寄存器和状态寄存器, 控制寄存器用于控制 TDC\_GP1 的测量模式, 结果寄存器用来存储测量结果, 状态寄存器指示 TDC\_GP1 的状态。 $\mu C$  程序通过设置 TDC\_GP1 中相应的控制寄存器来确定 TDC 的工作模式, 如各通道响应的 Stop Hits 的数目、触发脉冲状态等。

模块使用了 TDC\_GP1 的两个测量通道。Start 为起始信号, 接激光发射处的光电接收转换电路的输出

信号; Stop1 和 Stop2 为两路停止信号, 分别接红外和绿光海表回波的光电接收转换电路的输出信号; 复位信号 Reset 用于每次测量的复位, 与脉冲激光触发是同步的, 用来保证测量与激光发射的同步; Start、Stop1、Stop2 以及 Reset 的输入信号的电平均为 TTL 电平, 与探测器输出信号的常数比例甄别器输出信号相匹配。在脉冲激光测距中, 必须考虑到激光器电光调 Q 脉冲干扰引起的误 Start 信号, 和系统发射光学引起的误 Stop 信号。由于 TDC 芯片支持重触发模式, 即只响应第一个 Stop Hit 信号之前的最后一个 Start 脉冲信号。这样即使在激光发射前存在调 Q 干扰脉冲信号, TDC 也只响应最后一个 Start 信号, 即真正的激光信号。误 Stop 信号的防止是采用近场时间屏蔽窗来实现的, 由于飞行高度不可能低于 75 m, 因此屏蔽窗设置在 Start 信号后 0.5  $\mu\text{s}$ 。

为了防止模块时钟信号的不稳定而引入的误差, TDC\_GPI 需要对时钟信号进行刻度。为了保证高的时钟精度, 模块采用 20 MHz 高精度恒温晶振 (OCXO), 精度可达 0.01 ppm, 为 TDC 提供时间基准以及作为  $\mu\text{C}$  的时钟信号。TDC 对时钟的分频因子设为 64, 相应的测量范围为 5 ns~6.4  $\mu\text{s}$ 。

由  $\mu\text{C}$  将每个激光脉冲的测量结果从 TDC 的结果寄存器中读出送至 FIFO 中, 然后通过并行数字接口 (DIO) 送到 PCI 总线上, 并通知应用程序读取; 该模块还带有一个八位粗测数据输出口, 作为机载激光测深系统的时间基准, 用于触发光电探测器和数字化仪。

## 1.2 模块的应用程序设计

模块的工作模式, 数据传输都是通过  $\mu\text{C}$  的内置程序进行控制的, 图 3 为程序主要流程。首先 TDC 芯片对时钟进行刻度, 初始化后进行测量, 并读取数据, 然后控制 FIFO 与 DIO 接口。由于系统的测量重复率很高, 每次测量之后, 要求 TDC 核对时钟刻度是很困难的, 所以通过寄存器控制方式设置时钟刻度方式, 且每隔一定时间对时钟进行一次刻度。

每次测量结束, 通过设置读取指针指向的数据在结果寄存器中的起始位置, 就可以顺序地将结果从结果寄存器中读出; TDC 提供一个 8 bits 的数据输出口, 而在结果寄存器中数据是按 32 bits 存储的, 测深系

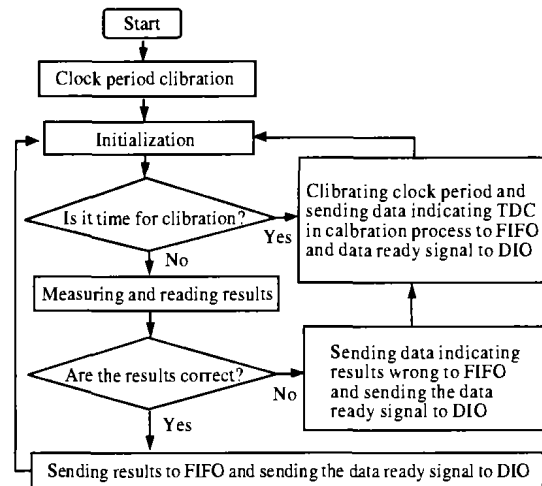


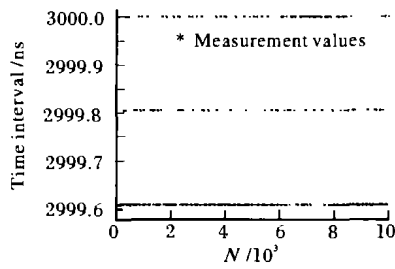
图 3 时间间隔测量模块的程序控制

Fig.3 Controlling flow chart of time interval module

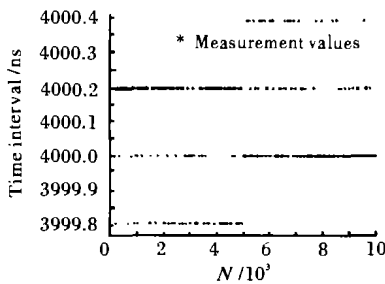
统最后要求的数据格式为 16 bits, 所以需要先将结果从 TDC 中读到  $\mu\text{C}$  中然后将其转换成 16 bits 的数据结果, 由于需要增加通道信息, 因此数据的第 0 位为通道标志位, 实际有效数据为 15 bits。  $\mu\text{C}$  得到结果后需检验结果是否正确, 若正确则将其送至 FIFO, 若不正确则向 FIFO 送特定数据表征测量结果有误, 并控制 TDC 重新进行刻度; 结果送至 FIFO 后,  $\mu\text{C}$  向并行数字接口发送数据已经准备好的中断信号 (Data ready), 并行数字接口在接收到数据后向  $\mu\text{C}$  发送数据已经被接收的信号 (Data received), 表示数据已正确接收; 最后并行数字接口通过 PCI 总线将数据传送给应用程序。

## 2 测试结果及分析

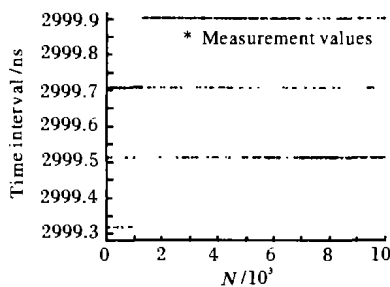
采用 SRS 公司的数字延时发生器 DG535 作为测试设备, 对研制的模块进行检测。DG535 的时间分辨率可达 5 ps, 有 2 组可编程延时信号输出口, 两组信号的延时量以参考时间信号输出口  $T_0$  为基准, 输出电平平均 TTL 电平。  $T_0$  参考信号接到时间间隔测量器的 Reset 通道上, 从其中一组延时信号中引出一路接到 Start 通道, 从另一组引出一路后分成两路分别送到 Stop1 和 Stop2 通道。按照机载激光测深系统的时序特点, Start 相对 Reset 的延时量设置为固定值 200  $\mu\text{s}$ ; Start=Reset+200  $\mu\text{s}$ ; Stop1 和 Stop2 相对 Start 的延



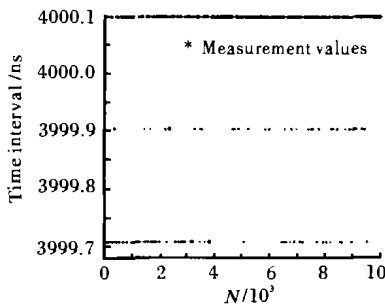
(a) 通道 1/ $\Delta T=3000$  ns  
(a) Channel 1/ $\Delta T=3000$  ns



(b) 通道 1/ $\Delta T=4000$  ns  
(b) Channel 1/ $\Delta T=4000$  ns



(c) 通道 2/ $\Delta T=3000$  ns  
(c) Channel 2/ $\Delta T=3000$  ns



(d) 通道 2/ $\Delta T=4000$  ns  
(d) Channel 2/ $\Delta T=4000$  ns

图 4 通道 1、2 在 3000 ns 和 4000 ns 处  $10^4$  次的测量数据  
Fig.4 Measured results for time interval of 3000 ns and 4000 ns in Channel 1 and Channel 2

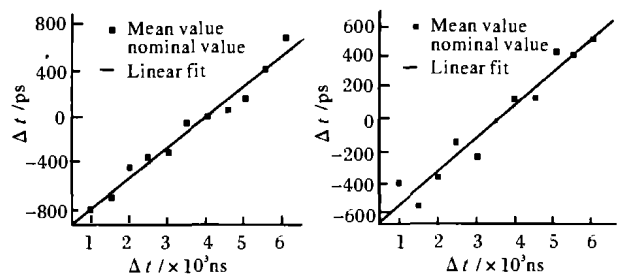
时为可变值  $\Delta T$ :  $Stop1 \& Stop2 = Start + \Delta T$ ; 并行数字接口采用 NI6503 DIO 卡, 操作平台采用 PC/Windows98 计算机平台, 并行数字接口的驱动程序为在 Windows 98 下编写的 VxD 程序、应用程序采用 Visual C++6.0 编写。

设置 DG535, 使得  $\Delta T=3000.000$ 、 $4000.000$  ns, 并进行 10000 次测量。图 4 为两个通道的测量结果, 测量的统计结果如表 1 所示。

表 1  $\Delta T=3000.000$ 、 $4000.000$  ns 的测试统计结果

Tab.1 Statistical results for time interval of 3000.000 ns and 4000.000 ns

Channel	1		2	
Nominal time interval inputted( $\Delta T$ )/ns	3000.000	400.000	3000.000	400.000
Mean/ns	2999.732	4000.090	2999.701	4000.012
Minimum/ns	2999.609	3999.805	2999.316	3999.707
Maximum/ns	3000.000	4000.391	2999.902	4000.098
Standard deviation/ns	0.166	0.159	0.177	0.150



(a) 通道 1  
(a) Channel 1  
(b) 通道 2  
(b) Channel 2

图 5 量程内的测量误差

Fig.5 Errors in the range of measurement

为了检验时间间隔测量模块在量程范围内的线性度, 将时间间隔  $\Delta T = 1000 \sim 6000$  ns, 每次变化的步长为 500 ns, 每组测量  $10^4$  次, 计算其平均值与对应标称输入  $\Delta T$  的差值。图 5 为两个通道的测试结果, 可以看出模块在整个量程范围内都保持很好的线性度。两个通道的相关系数分别为: 0.98455 (通道 1)、

0.97203(通道2)。测量结果如图5所示。

由以上数据可以看出,所研制的模块在量程范围内的标准误差约为150 ps,且有较好的线性度,通道1的线性度优于通道2。在3.0~4.0  $\mu\text{s}$ 范围内,测量误差 $\Delta t$ 靠近零,而在其两侧 $\Delta t$ 符号相反,这是因为设置TDC对20 MHz时钟的分频因子为64,这样参考时钟周期 $T_{ref}=3.2 \mu\text{s}$ ,所以才会出现这种情况。另外也可以看出测量的结果存在明显的量子化效应,这一方面与最终输出的结果数据只有15 bits有关,最后一位的权重为195 ps,所以测出的结果以195 ps跳变;另一方面TDC采用的是延迟线插入法,测量的结果必定是离散的,其最高时间间隔分辨力只能达到一个LSB(最高为250 ps),这是其极限误差。此外,测量结果的跨度约为588 ps,这主要是因为TDC和恒温晶振采用同一电源隔离器供电,而恒温晶振的功耗较大势必对供电电压的稳定性造成影响,从而影响TDC测量的精度。而且本模块采用的是两层PCB板制作,因此在信号抗干扰上还有待完善。

### 3 结论

采用TDC专用芯片开发的模块,不仅线路简单,控制和使用也非常方便,利用计算机总线,便于集成。研制的时间间隔测量模块达到了机载激光测深系

统所要求的测距精度,并已经用于系统中。在以后的改进中,可以采用更高时间分辨率的专用时间数字转换芯片,对晶振和时间数字转换芯片分开供电,并进一步提高供电电压的稳定性,在电路制作上可以采用四层或者更高的制作工艺,提高线路的抗干扰能力。研制的模块可用于任何脉冲激光测距和时间间隔测量应用中。

### 参考文献:

- [1] Thmoas R W L, Guenther G C. Water surface detection strategy for an airborne laser bathymetry[A]. SPIE: Ocean Optics X[C]. 1990, 1302. 597-611.
- [2] 陈卫标, 陆雨田, 褚椿霖, 等. 机载激光水深测量的精度分析[J]. 中国激光, 2004, 31(1): 101-104.
- [3] 霍玉晶, 陈千颂, 潘志文. 脉冲激光雷达的时间间隔测量综述[J]. 激光与红外, 2001, 31(3): 136-139.
- [4] Acam-messelectronic gmbh. Am Hasenbiehl 27-D-76297, Stutensee-Blankenloch-Germany [EB/OL]. [http://www.acam.de/Documents/English/DB\\_GPI\\_e.pdf](http://www.acam.de/Documents/English/DB_GPI_e.pdf), 2001-2-12.
- [5] NATIONAL instruments. PCI-6503 User Manual [DB/OL]. <http://www.ni.com/pdf/manuals/320938c.pdf>.
- [6] Karen Hazzah; 孙喜明. Windows Vxd 与设备驱动程序权威指南. 第二版[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [7] Fredriksson K, Galle B, Nystrom K, et al. Mobile lidar system for environmental probing[J]. Appl Opt, 1981, 20(24): 4181-4189.
- [8] Tetsuo Fukuchi, Naohiko Goto, Nemoto K, et al. Error analysis of SO<sub>2</sub> measurement by multiwavelength differential absorption lidar [J]. Opt Eng, 1999, 38(1): 141-145.
- [9] Takashi Fuji, Tetsuo Fukuchi, Nao hiko Goto, et al. Dual differential absorption lidar for the measurement of atmospheric SO<sub>2</sub> of the order of parts in 10<sup>9</sup>[J]. Appl Opt, 2001, 40(6): 949-956.
- [10] Takashi Fuji, Tetsuo Fukuchi, Nianwen Cao, et al. Trace atmospheric SO<sub>2</sub> measurement by multiwavelength curve-fitting and wavelength optimized dual differential absorption lidar[J]. Appl Opt, 2002, 43(3): 524-531.

(上接第154页)

- [1] on Remote Sensing of Environment[C]. University of Michigan, 1996, 273-283.
- [2] Fredriksson K, Galle B, Nystrom K, et al. Lidar system applied in atmospheric pollution monitoring[J]. Appl Opt, 1979, 18: 2998-3003.
- [3] Egeback A L, Fredriksson K A, Hertz H. DIAL techniques for the control of sulfur dioxide emissions[J]. Appl Opt, 1984, 23(5): 722-729.
- [4] Yinchao Zhang, Huh Huanling, Kan ten, et al. A mobile lidar system for air pollution measurement[A]. SPIE 3rd International Asia-Pacific Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment, and Space[C]. Hangzhou, SPIE, 2002.
- [5] Browell E V, Ismail S, Shipley S T. Ultraviolet DIAL measurements of O<sub>3</sub> profiles in regions of spatially inhomogeneous aerosols[J].