文章编号：1672-8785(2018)05-0013-07

基于 TDC7201 芯片的高精度激光脉冲飞行时间测量模块研究

汪佳佳[1,2,3]　刘鸿彬[1,2,3]　李　铭[1,2]　张冰娜[1,2*]

（1. 中国科学院空间主动光电技术重点实验室，上海　200083；
2. 中国科学院上海技术物理研究所，上海　200083；
3. 中国科学院大学，北京　100049）

摘　要：设计了一种高精度、高线性度、轻小型激光脉冲飞行时间测量模块。结合 TDC7201 芯片在时间测量方面的优势，将其作为时间测量核心部分，并将 STM32F103RET6 微控制器作为主控芯片来控制整个模块的工作。实验结果表明，该模块在 12 ns～100 μs 时间间隔范围内的时间测量精度最高可达 4.1 ps；测量结果的线性拟合相关系数为 1，且能够测量激光脉冲主波与 5 个回波之间的时间间隔。该模块可满足基于硅光电倍增管(Silicon Photomultiplier，SiPM)的脉冲式激光测距系统的高精度、高线性度、多回波、轻量化等实际应用需求。

关键词：TDC7201；时间测量；高精度；高线性度；多回波

中图分类号：TN247　**文献标志码：**A　**DOI：**10.3969/j.issn.1672-8785.2018.05.003

Research on High Precision Laser Pulse Time Measurement Module Based on TDC7201

WANG Jia-jia[1,2,3], LIU Hong-bin[1,2,3], LI Ming[1,2], ZHANG Bing-na[1,2*]

(1. *Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*;
2. *Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*;
3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: A high precision, high linearity, light and small module for measuring time of flight of laser pulses is designed. Because the TDC7201 chip has advantages in time measurement, it is used as the core for time measurement. The STM32F103RET6 microcontroller is used as the main control chip for controlling the whole module. The experimental results show that the module has its time measurement accuracy up to 4.1 ps in the time interval range from 12 ns to 100 μs. The linear fitting correlation coefficient of the measurement result is 1. It can measure the time intervals between the main laser pulse and five echoes. This module can meet the practical application requirements of high precision, high linearity, multi-echo and lightweight of the pulsed laser ranging systems based on SiPM.

Key words: TDC7201; measurement of time intervals; high precision; high linearity; multiple echoes

收稿日期：2018-03-07

作者简介：汪佳佳(1993-)，女，安徽安庆人，硕士研究生，主要研究方向为脉冲式激光测距系统设计。

*通讯作者：E-mail：zhang_bn@mail.sitp.ac.cn

0 引言

由于具有测量距离远、精度高、速度快等优点，脉冲式激光测距技术近些年来被广泛应用于许多拥有便捷需求的场合（车载、机器人、无人机等）。在脉冲式激光测距系统中，常用于回波探测的探测器有雪崩光电二极管（Avalanche Photodiode，APD）和光电倍增管（Photomultiplier Tube，PMT）。而 SiPM 作为一种新型光电探测器，由于具有对磁场不敏感、工作电压低、响应速度快、灵敏度高、体积小等明显优势[1]，为人们设计便携式、轻小型的脉冲式激光测距系统提供了一条新的途径。其中，设计出一种小尺寸、高精度、高线性度的激光飞行时间测量模块，是实现基于 SiPM 的轻小型脉冲激光测距系统的基础。

时间测量模块设计的关键是时间测量方法的选择。常用的时间间隔测量方法包括时间间隔扩展法、时间幅度转换法以及传输线延时法[2]。其中，传输线延时法是一种全数字式计时方法。与其他方法相比，该方法具有可靠性强、集成性高等优势。它可采用高速 FPGA 芯片或者专用集成芯片来实现。在用基于高速 FPGA 的传输线延时法进行时间测量时，测时精度最高可达到 ps 级别[3-4]，但这类方法也存在芯片引脚多、体积大、功耗高、系统相对复杂等缺点。近些年来，很多基于传输线延时法的时间数字转换（Time-to-Digital Converter，TDC）芯片投入生产并得到了实际应用。比如，德国 ACAM 公司生产的 TDC-GP 系列芯片在实际应用中可实现 60 ps 的精度[5-7]。前些年，美国德州仪器（Texas Instruments，TI）公司也推出了两款 TDC 芯片——TDC7200 和 TDC7201[8]。这两款芯片与 TDC-GP 系列芯片的测量精度相当且都可进行多回波测量，但 TDC7201 芯片还具有连续测量范围大、体积小、功耗低等优势，因此更加适合无人机、机器人等对系统体积和功耗有具体要求的应用场合。

本文设计并实现了一种基于 TDC7201 芯片的高精度激光脉冲飞行时间测量模块。该模块体积小，并具有信号调理、时间测量、数据分析与处理等功能。经测试可知，在 12 ns～100 μs 时间间隔范围内，本模块的测时精度最高可达 4.7 ps；测量结果的线性拟合相关系数为 1，且能够测量激光脉冲主波与 5 个回波之间的时间间隔。本模块可满足基于 SiPM 的激光测距系统在高精度、高线性度、多回波、系统简单化等方面的测量要求。

1 基于 SiPM 的脉冲式激光测距系统

图 1 为基于 SiPM 的脉冲式激光测距系统的结构示意图。激光器发出的激光脉冲被分光器分为两部分，其中一部分作为主波直接由高速 PIN 管探测模块接收并被转换为电压信号，而另一部分则经过发射光学模块后到达物体表面，由物体反射的回波再经接收光学模块会聚后到达回波探测模块。在回波接收方面，本系统采用爱尔兰 SensL 公司生产的 C10020 型 SiPM，其工作电压仅为 25.2～29.7 V。与 APD 及 PMT 相比，SiPM 不需要额外的高压模块，使系统变得更加小型化。

经过 SiPM 探测模块后，光脉冲信号被转换为微弱电流信号，接着由跨阻放大模块转换成电压信号。主波和回波电压信号作为 start 及 stop 脉冲经过信号调理及时间测量模块，此时通过计算即可得到激光脉冲从发出到接收的飞行时间 t，进而可以得到目标与参考点之间的距离 l：

$$l=\frac{1}{2}c\times t \tag{1}$$

由式(1)可知，在脉冲式激光测距系统中，时间测量单元是实现高精度脉冲测距的前提，它直接决定了整个系统的性能。

随着各种便携式应用的发展，人们需要实现距离为 2 m 的高精度近程测距，以满足车载避障等需求；而对于中远程测距，小型脉冲测距系统的指标一般设置在 15 km 以内。因此，本文系统的距离测量范围定为 2 m～15 km，测距精度≤2 cm。相应地，时间测量模块的测时范围为 13.3 ns～100 μs，测时精度≤133.2 ps。

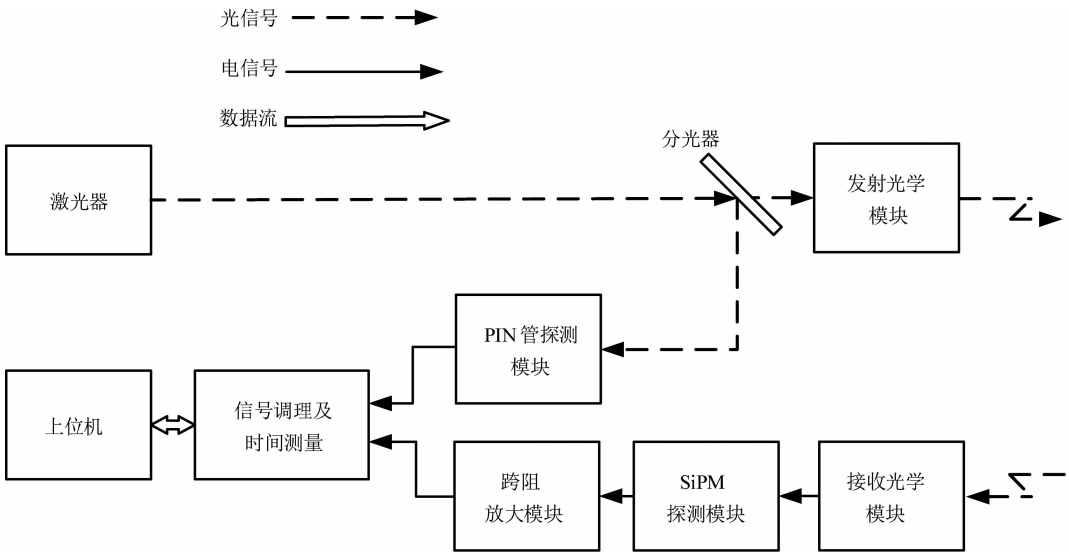


图 1 基于 SiPM 的脉冲式激光测距系统的结构示意图

2 基于 TDC7201 芯片的激光脉冲飞行时间测量模块的硬件设计

2.1 TDC7201 芯片简介

TI 公司于 2016 年推出的 TDC7201 芯片的内部有两个由环形振荡器与粗值计数器构成的 TDC 内核。通过确定从计时开始到结束所经环形振荡器的个数就可以得到时间信息，而粗值计数器则用于记录计时结束时环形振荡器的位置并将结果存放在相应的寄存器中。除了粗值计数器之外，每个 TDC 内核外还有一个时钟计数器。

TDC7201 芯片内部的两个 TDC 内核分别对应于两组 START 和 STOP 通道，且两个 STOP 通道都可以检测 5 个 STOP 脉冲。两路 TDC 时间测量的分辨率均为 55 ps，测量结果的标准差为 35 ps。在实际工作中，两路 TDC 的时间测量可以分别进行，且都有两种工作模式。测量模式一：仅用 TDC 内核的环形振荡器及粗值计数器进行时间测量（范围为 12 ns～2000 ns）。测量模式二：用粗值计数器和时钟计数器进行联合测量（范围较大，为 250 ns～8 ms）。两路 TDC 也可同时工作，从而构成组合模式。该模式可以实现大范围的时间间隔测量，所对应的时间测量范围为 0.25 ns～8 ms。

表 1 列出了 TDC7201 与 TDC7200 及 ACAM 公司生产的 TDC-GP 系列产品的性能对比情况。从表 1 中可以看出，TDC7201 可测量 5 个 stop 信号，测时分辨率为 55 ps，精度为 35 ps，且可连续测量 0.25 ns～8 ms 的范围，能满足本模块的指标要求。另外，该芯片的工作电流仅为 2.7 mA，且采用小体积的 NFBGA25 封装，与其他型号芯片相比具有明显优势。所以，本模块采用 TDC7201 进行时间测量。

2.2 模块整体架构

基于 TDC7201 芯片的高精度激光脉冲飞行时间测量模块由信号调理、主控、时间测量和 DAC 等四部分构成。图 2 为该模块的整体框图。

由于进入到激光脉冲飞行时间测量模块的信号脉宽很窄（＜10 ns），而 TDC7201 芯片可接收到的信号脉宽至少应达到 10 ns 且为 LVTTL 电平，所以在进行时间测量之前，需先进行信号调理。图 3 所示为信号调理单元的电路结构。

输入的窄脉冲信号 START_IN、STOP_IN 与模拟阈值电压 CMP_START、CMP_STOP 被 MAX9601 高速 LVPECL 电平比较器转换为 LVPECL 电平脉冲，然后被由 MC100LVEL51 高速 LVPECL 电平 D 触发器构成的脉冲展宽部分转换为 20 ns 宽的 LVPECL 电平脉冲，最后被 MC100EPT21 电平

表 1 各种 TDC 芯片的性能对比

型号	通道数	可测 stop 脉冲数	最高分辨率	最高精度	最大测量范围	通信接口	工作电压	工作电流	封装
TDC7200	1	5	55 ps	35 ps	250 ns～8 ms	SPI 接口	2～3.6 V	1.35 mA	TSSOP14
TDC7201	2	5	55 ps	35 ps	0.25 ns～8 ms	SPI 接口	2～3.6 V	2.7 mA	NFBGA25
TDC－GPX	11	32	10 ps	10 ps	0～65 μs	并行总线接口	2.4～3.6 V	20 mA	TQFP100、TFBGA120
TDC－GP1	2	4	125 ps	100 ps	60 ns～200 ms	并行总线接口	2.7～5.5 V	20 mA	TQFP44
TDC－GP2	2	4	65 ps	50 ps	500 ns～4 ms	SPI 接口	1.8～3.6 V	15 mA	QFN32
TDC－GP21	2	4	45 ps	50 ps	500 ns～4 ms	SPI 接口	2.5～3.6 V	4 mA	QFN32
TDC－GP22	2	4	22 ps	50 ps	500 ns～4 ms	SPI 接口	2.5～3.6 V	4 mA	QFN32

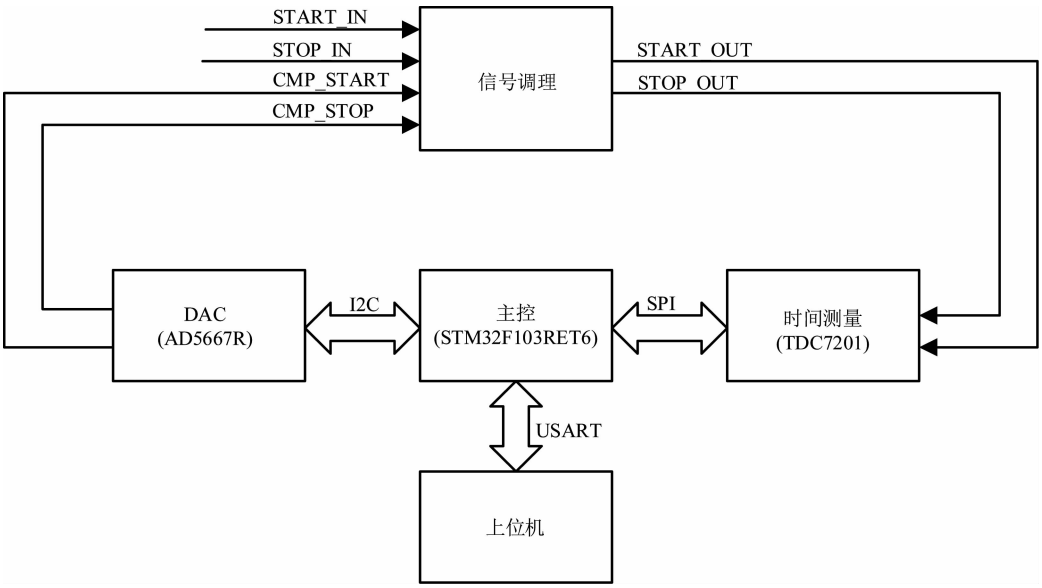


图 2 模块整体框图

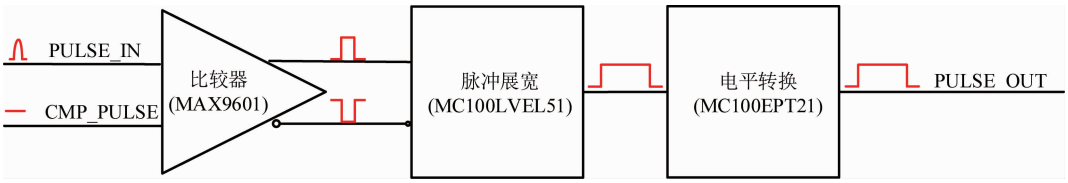


图 3 信号调理单元的电路结构

转换芯片转换为 LVTTL 电平脉冲，即 START_OUT 和 STOP_OUT。

在接收到 START_OUT 和 STOP_OUT 信号后，基于 TDC7201 芯片的时间测量单元可以得到两个信号之间的时间间隔，并通过 SPI 接口将测量结果传输给主控芯片。主控芯片选用基于 Cortex-M3 内核的具有电压低、功耗小等优势的 32 位 STM32F103RET6 微控制器[9]。该芯片在与时间测量部分进行通信的同时，还通过 USART 接口与上位机进行通信，并由上位机对测量结果进行显示和存储。图 4 为 TDC7201 芯片与 STM32F103RET6 微控制器的连接图。

START、STOP 信号可接入 TDC7201 芯

片的任意一组 START、STOP 接口。TDC7201 芯片内部的两路 TDC 与 STM32F103RET6 微控制器之间的通信均由 SPI 接口完成，它们由 CSB、SCLK、MOSI、MISO 四个信号构成。同时，ENABLE、TRIGG1/2、INTB1/2 引脚也需与 STM32-F103RET6 微控制器连接。另外，TDC7201 芯片的工作还需有一个时钟输入。因此，本文选用 ASFLMB-8MHz-LY-T 晶振来提供 8 MHz 的时钟输入。该晶振的频率稳定度为 10 ppm。

由于信号调理单元需要两个模拟阈值电压，为方便对比较电压进行控制，本模块选用 16 位 AD5667R 两通道 DAC 芯片[10]。该芯片与 STM32F103RET6 微控制器之间通过 I2C 接口进行通信，用于提供两路比较电压 CMP_START 和 CMP_STOP，并将其输出给信号调理单元进行电压比较。

3 基于 TDC7201 芯片的激光脉冲飞行时间测量模块的软件设计

本模块的软件编程语言为 C 语言，软件开发环境选用 ARM 公司推出的 Keil uVision 5 开发工具。图 5 为用 STM32F103RET6 微控制器对 TDC7201 芯片进行控制的流程图。

首先，需要对 TDC7201 芯片的工作条件进行初始化，包括指定时间测量开始状态、测量模式、测量 STOP 脉冲个数、STOP 脉冲开始计时时刻、粗值计数及时钟计数的最大值等。

在完成初始化后，便可接收 START 信号。待接收到 START 信号后，时钟计时开始。接着需要判断到达计数最大值时 STOP 信号是否到达：若 STOP 信号还未到达，则产生计数最大值中断，计时停止；若在计数最大值之前，设定个数的 STOP 信号都已到达，则产生测量结束中断，此时时间测量结果被存放在测量结果寄存器中。通过 SPI 读取寄存器数值。该数据经转换后可以得到 START 和 STOP 信号之间的时间间隔，最后由上位机加以显示和存储。一次时间测量的过程到此结束。若要进行多次测量，则需回到初始化阶段，然后继续进行下一次测量。

4 模块性能测试及分析

为了验证本模块的性能，采用 Keysight 81160A 信号发生器产生周期及脉宽相同且延时为定值的两路信号，并将其输入到电路板的 START 和 STOP 输入端。

受信号源、电缆以及电路板布线等因素的影响，本模块在实际测量时会有绝对误差。因此需要确定该误差并对测试结果进行校正。我们将信号源两通道脉冲的时间间隔设定为 1 μs。在进行 1000 次测量后，求得均值为

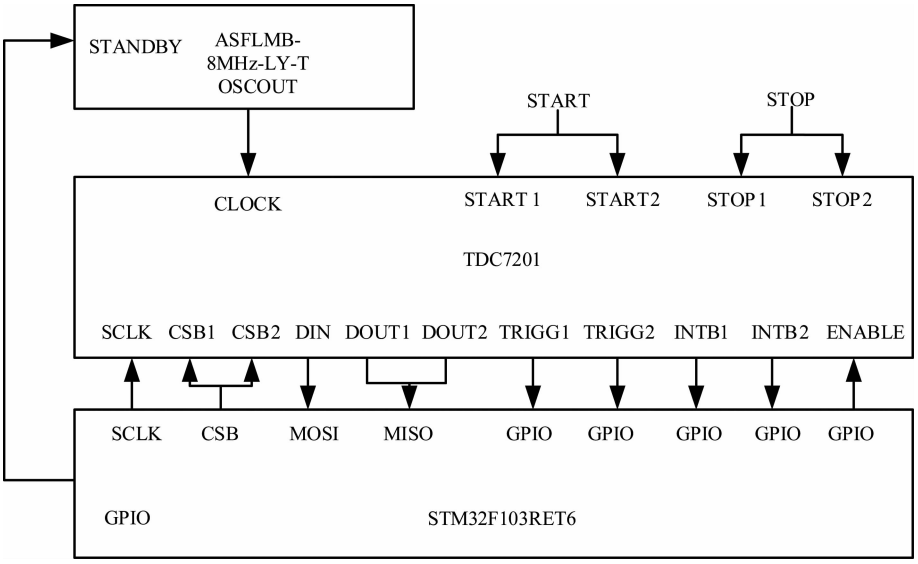


图 4　TDC7201 芯片与 STM32F103RET6 微控制器的连接图

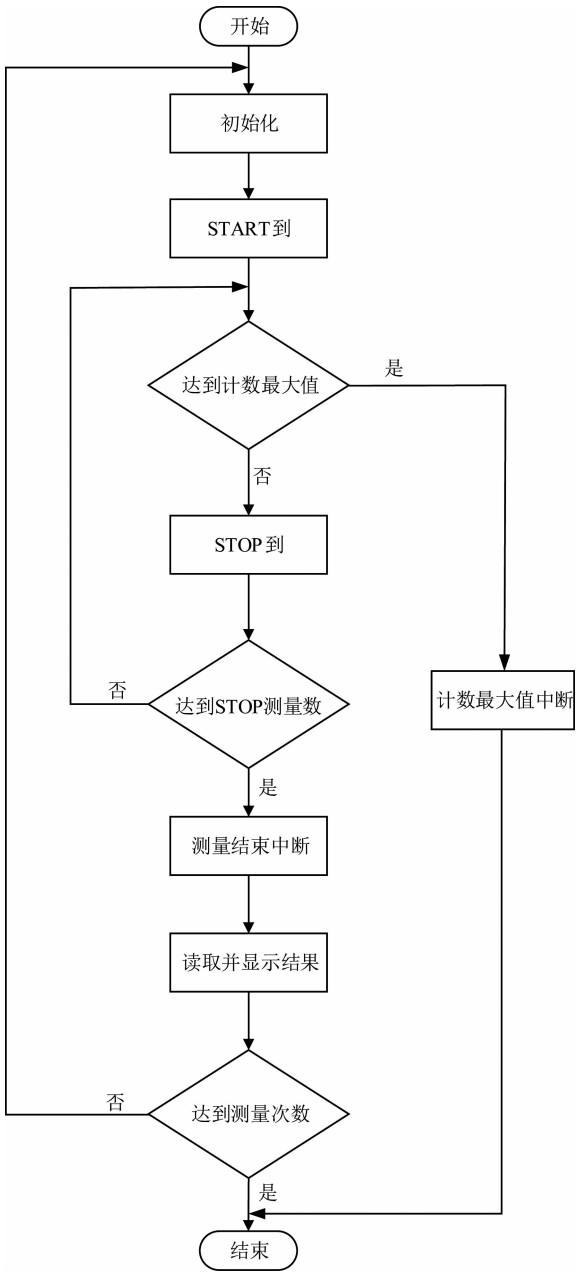


图 5 STM32F103RET6 微控制器与 TDC7201 芯片及上位机进行通信的流程图

999.916 ns。由此确定本模块的绝对误差为 0.084 ns。

4.1 时间测量精度

将 START、STOP 信号时间间隔设定为某一定值，对该时间进行 1000 次测量后获得了一组测量值。通过对该组值的均方根误差、密度分布等特性进行分析，得到了本模块的时间测量精度。图 6 为时间间隔为 12 ns 和 10 μs 时的测量结果分布直方图。

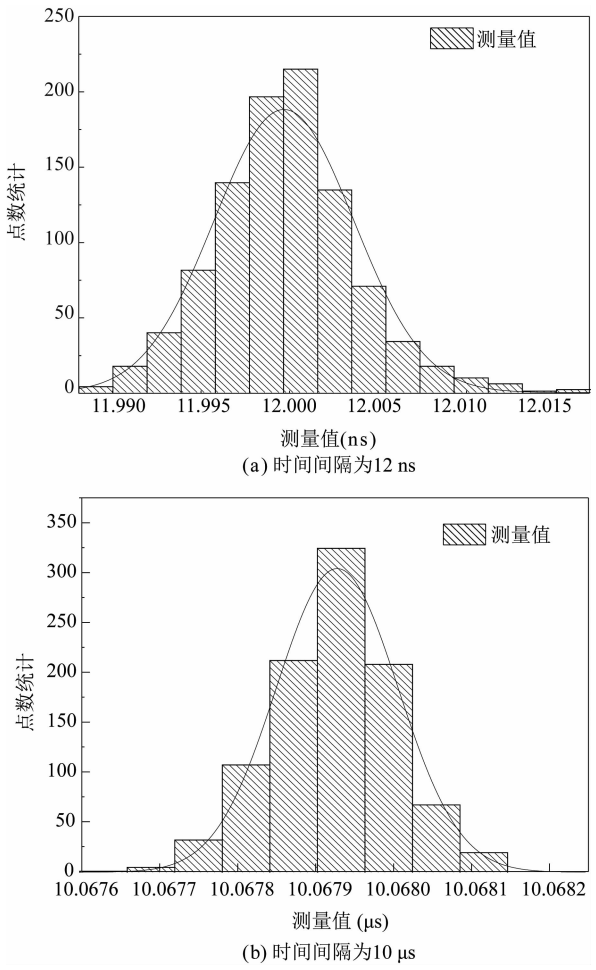


图 6 测量结果分布直方图

从图 6 中可以看出，测得的每组时间间隔值近似呈正态分布，对应于 12 ns 和 10 μs 的标准差分别为 4.1 ps 和 77.2 ps，相应的测距标准差分别为 0.615 mm 和 11.6 mm。

另外，我们还对多个时间间隔进行了 1000 次测量，并计算了每组数据的标准差(结果见表 2)。

表 2 多组时间间隔测量结果

设定时间间隔值	测量标准差
12 ns	4.1 ps
20 ns	9.5 ps
50 ns	18.3 ps
100 ns	23.7 ps
500 ns	37.1 ps
1 μs	46.7 ps
10 μs	77.2 ps
50 μs	96.8 ps
100 μs	101.3 ps

从表 2 中可以看出，测量结果的精度最高可达 4.1 ps。但随着时间间隔的增加，测量结果的标准差会增大。

在基于 TDC7201 芯片的时间测量单元中，晶振的稳定度会直接影响时间测量结果的精度，而且时间间隔越长，晶振的温漂对测量结果的影响越明显。而本模块中为 TDC7201 芯片提供时钟的是 ASFLMB-8MHz 型晶振，其频率稳定度仅为 10 ppm，性能远不及温补晶振。所以在后续设计中，需要考虑使用温补晶振为 TDC7201 芯片提供时钟，以提高测量精度。

4.2　时间测量线性度

为了验证本模块的时间测量线性度，我们对 12 ns～100 μs 范围内的多个时间间隔进行 1000 次测量，然后求取每 1000 次测量结果的平均值，并对模块的绝对误差进行补偿，最后再进行线性度拟合。

图 7 所示为 12 ns～100 μs 范围以及其中 300 ns～1 μs 范围内的多个时间间隔测量结果的线性度拟合数据。

从图 7 中可以看出，在 12 ns～100 μs 整段范围以及其中 300 ns～1 μs 范围内，本模块的时间测量线性度都很高，拟合结果的线性相关系数为 1，拟合斜率的数值均为 1，拟合斜率的标准差仅为 4.50×10^{-7} 和 2.88×10^{-6}。

4.3　多回波测试

为了验证本模块的多回波测试性能，我们使信号发生器的一个通道产生一个脉冲，并将该脉冲作为 START 信号；使另一个通道产生不同时间间隔的 5 个脉冲，并将这 5 个脉冲作为 5 个 STOP 信号；然后对 1 个 START 信号与 5 个 STOP 信号的时间间隔进行测量。表 3 列出了多回波测试结果。

从表 3 中可以看出，该模块可以同时探测 1 个主波与 5 个回波的时间间隔。主波与回波的间隔在 300～4800 ns 范围内，时间测量结果的标准差小于 85 ps，校正后的测量值与实际值的相对误差小于 15 ps。对应于距离测量，标准差小于 12.8 mm，相对误差小于 2.25 mm。

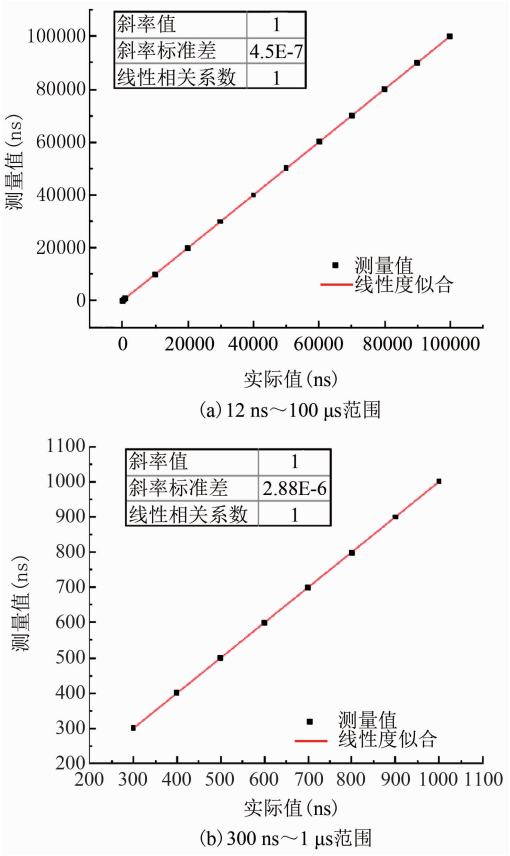


图 7　多个时间间隔测量结果的线性度拟合

表 3　多回波测试结果

STOPx	START、STOPx 实际间隔(ns)	校正后的测量值(ns)	标准差(ps)	相对误差(ps)
STOP1	300	300.010	61.5	10
STOP2	800	800.013	62.7	13
STOP3	1300	1300.005	63.6	5
STOP4	1800	1800.007	67.3	7
STOP5	2300	2299.998	71.3	2
STOP1	800	800.010	57.5	10
STOP2	1800	1800.007	67.6	7
STOP3	2800	2800.005	77.7	5
STOP4	3800	3800.003	84	3
STOP5	4800	4800.006	83.1	6

5　结束语

本文结合基于 SiPM 的轻小型脉冲激光测距系统的应用需求以及 TDC7201 时间测量芯

（下转第 36 页）