

激光与光电子学进展

旋转激光扫描测量系统同步信号电路延时补偿

郭同闯, 任永杰*, 林嘉睿, 金云超, 张振宇

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 旋转激光扫描测量系统采用光电扫描的计时方式并结合时空转换的原理实现角度交会定位, 光电信号时域信息的精确性是影响测量精度的重要因素之一。针对测量系统中同步信号存在延时的问题, 根据测角误差的特性提出一种基于发射基站转台正、反转测量目标的延时评估方法。通过定量分析同步信号的延时, 建立同步信号的延时模型。基于可编程逻辑器件分析延时对测角精度的影响, 研究同步信号电路延时的补偿算法并设计实验进行验证。实验结果表明, 所提方法能够有效补偿同步信号原有约为 190 ns 的电路延时。

关键词 测量; 大尺寸测量; 旋转激光扫描; 同步信号; 延时补偿; 正、反转评估

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0312002

Delay Compensation for Synchronization Signal in Rotating Laser-Scanning Measurement System

Guo Tongchuang, Ren Yongjie*, Lin Jiarui, Jin Yunchao, Zhang Zhenyu

State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tianjin University,
Tianjin 300072, China

Abstract A rotating laser-scanning measurement system utilizes a photoelectric-scanning timing method and combines the principle of space-time conversion to provide angle- rendezvous positioning. The accuracy of the time-domain information in the photoelectric signal is an important factor, which affects the measurement accuracy. To address the problem of delay in the synchronization signal in the measurement system, we propose a delay-evaluation method that uses forward- and reverse-measurement targets on the transmitter base-station turntable according to the characteristics of the angle-measurement error. By quantitatively analyzing the delay in the synchronization signal, we first establish a delay model for the synchronization signal. Using a programmable logic device, we then analyze the influence of the delay on the accuracy of the angle measurement, study the algorithm used to compensate for the synchronization signal circuit delay, and design experiments to verify it. The experimental results show that the proposed method can effectively compensate for an original circuit delay of approximately 190 ns in the synchronization signal.

Key words measurement; large-scale measurement; rotating laser-scanning; synchronous signal; delay compensation; forward and reverse rotation evaluation

OCIS codes 120.3940; 120.7000; 120.1880; 140.3460

收稿日期: 2020-06-10; 修回日期: 2020-06-25; 录用日期: 2020-07-01

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0204802)、国家自然科学基金(51775380, 51721003)、天津市自然科学基金(18JCYBJC19400)

*E-mail: yongjieren@tju.edu.cn

1 引言

随着计算机技术、自动化技术和通信技术等融合与协同发展,大型装备制造业的数字化转型和智能化升级均需要成熟且高效的大尺寸精密测量技术作为支撑^[1-2]。近年来,旋转激光扫描测量系统凭借其可拓展的分布式网络测量模式和高精度多任务并行测量等优势,已广泛应用于飞机和船舶等大型装备制造领域^[3-4]。

旋转激光扫描测量系统基于光电扫描测角的方式并结合空间角度交会的原理,实现对被测目标的三维坐标测量。测量系统由发射基站来构建定位网络,每台基站均发射旋转扫描激光和同步脉冲激光以形成全覆盖的信息网络。远端接收器根据基站光电脉冲时间间隔与转速的匹配关系来识别信号来源,并通过同步光-扫描光的相位关系来计算基站扫描旋转角度,从而实现时间-空间角度变换及多角度交会定位。7D Kinematic Metrology 公司的 indoor GPS (iGPS)、天津大学研制的空间测量定位系统 (wMPS) 和西安交通大学研制的旋转激光经纬仪定位系统均是基于这一原理研发的定位系统^[5-7]。多基站角度交会测量是测量系统实现精准定位的关键步骤之一,测角精度决定了系统的目标定位能力,而系统的测角精度主要受到扫描激光面型、转速稳定性和同步脉冲触发误差等因素的影响^[8-9]。目前,文献^[10]提出了基于激光面面型的视觉评估方法,采用该方法重建了更贴近实际的扫描激光面数学模型,文献^[11-12]采用了精确的电机速度控制算法并根据反馈的电机转速来实时补偿和提高转速稳定性。

当转台单周旋转经过零位起点时,基站会发射同步脉冲激光来提供扫描光开始旋转的时域信息,这在同步光-扫描光的相位测量中起着决定性的作用^[13]。信号延时容易引入同步脉冲触发误差,造成扫描光旋转的计时起点滞后,从而影响系统的测角精度,因此对同步信号延时进行研究并补偿以提升测量系统的性能。目前,对信号延时主要采用作差法、软件算法和硬件调整时间同步法等进行补偿^[14-15]。其中作差法不适用于单一信号存在延时的场景,软件算法虽然可以减少延时引入的误差,但并未改变实际系统中的延时信号,当系统存在较多的延迟信号时,软件算法在补偿过程中会变得繁琐且不易实施,而硬件调整时间同步法可以在信号延

时的源头进行修正,从而减少后续的补偿环节。本文以天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室自主研发的 wMPS 作为实验平台并展开研究,在分析同步信号延时引入测角系统误差的基础上,研究一种基于发射基站转台正、反转测量同一目标的延时评估方法。针对同步信号的延时环节,从电路延时和飞行延时两方面分析并建立延时模型。利用可编程逻辑器件 (CPLD) 分析延时对测角精度的影响,并研究基于 CPLD 的延时补偿算法,设计实验验证该算法的有效性。

2 同步信号延时评估

2.1 光电扫描测角的原理

旋转激光扫描测量系统基于光电扫描测角的方式并结合空间角度交会的原理,实现对被测目标的三维坐标测量。当发射基站工作时,转台匀速旋转并带动两束夹角一定的扫描激光对周围空间进行覆盖扫描。当转台经过零位起点时,基站内部的光电码盘所输出的零位信号会触发激光器发射同步频闪激光,此时作为计时起点。根据接收器接收光信号的时间间隔可计算得到基站扫描周期 T 和两束扫描光的扫描时间 t_1 和 t_2 ,如图 1 所示。

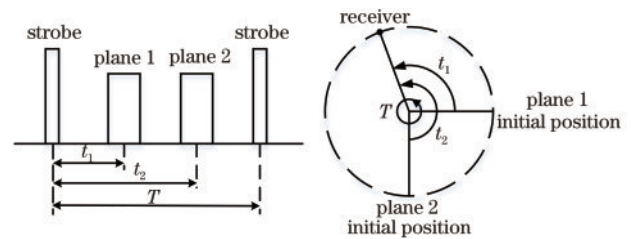


图 1 光平面扫描示意图

Fig. 1 Schematic of optical plane scanning

根据时空转换原理可知,圆周角度 θ 与扫描周期 T 唯一对应,因此可以通过扫描时间来计算扫描光的旋转角度^[16]。两束扫描光的旋转角度可表示为

$$\theta_i = 2\pi t_i / T, \quad (1)$$

式中: i 为扫描光的序号, $i = 1, 2$; t_i 为扫描光 i 的扫描时间。同步信号延时主要来源于同步光电路信号处理环节和同步光空中飞行环节,从而造成扫描光的计时起点滞后,进而引入测角系统误差,如图 2 所示。其中 t_1' 和 t_2' 分别表示扫描光由初始位置旋转至接收器的实际扫描时间, Δt 为同步信号延时。

从图 2 可以看到,受到同步信号延时的影响,光平面的扫描时间偏短,导致测量的旋转角度小于真

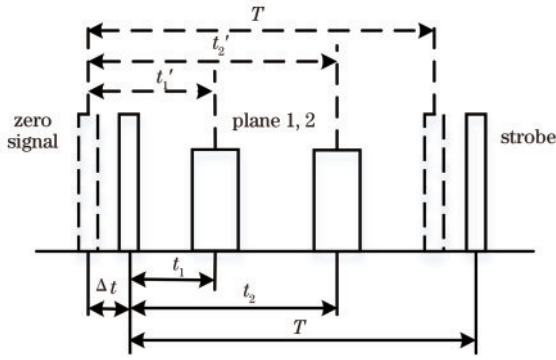


图 2 存在延时的扫描时间示意图

Fig. 2 Schematic of scanning time with delay

实值。两束扫描光的实际旋转角度应为

$$\theta_i' = 2\pi t_i' / T = 2\pi(t_i + \Delta t) / T, \quad (2)$$

式中： θ_i' 为扫描光*i*的实际旋转角度； t_i' 为扫描光*i*的实际扫描时间。结合(1)式和(2)式可知，同步信号延时引入的测角系统误差为

$$\Delta\theta = \theta' - \theta = 2\pi\Delta t / T. \quad (3)$$

2.2 正、反转延时评估方法

当逆时针方向旋转的基站转台对目标进行测量时，同步信号存在延时，这会导致 t_1 和 t_2 分别小于 t_1' 和 t_2' 。经过时间-空间角度变换后，解算的接收器位置比实际位置靠前，如图 3 所示。

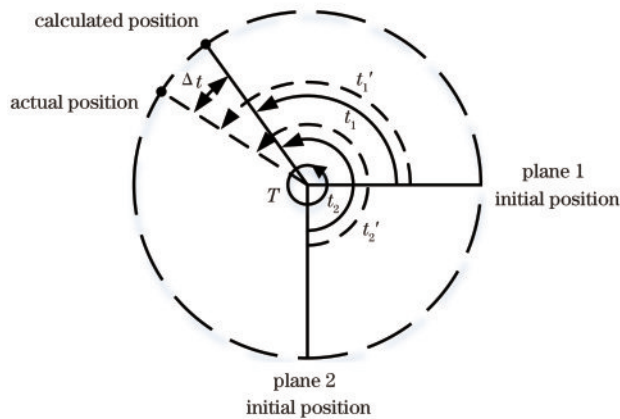


图 3 接收器的实际位置与解算位置对比

Fig. 3 Comparison of actual position and calculated position of receiver

考虑到顺时针方向旋转的基站转台，同步信号延时对 t_1 和 t_2 的影响依然存在，此时接收器的解算位置比实际位置靠前。当基站转台在顺时针和逆时针方向对目标进行测量时，同步信号延时造成的测角误差分别体现在接收器实际位置的两侧。根据同步信号延时导致的测角误差与基站旋转方向

有关，以及两个测角误差大小相等的特性，可采用基站转台在正、反方向旋转测量同一目标的方法对同步信号的延时进行评估^[17]。当保持接收器位置不变时，应有

$$t_{i,p}' + t_{i,n}' = T, \quad (4)$$

式中： $t_{i,p}'$ 为基站在顺时针方向旋转扫描光*i*的实际扫描时间； $t_{i,n}'$ 为基站在逆时针方向旋转扫描光*i*的实际扫描时间。当单向旋转的基站对目标进行测量时，由于受到同步信号延时的影响，则 $t_i' = t_i + \Delta t$ ，结合(4)式可得

$$t_{1,p} + t_{1,n} + t_{2,p} + t_{2,n} + 4\Delta t = 2T, \quad (5)$$

式中： $t_{1,p}$ 为基站在顺时针方向旋转测量扫描光 1 的扫描时间； $t_{1,n}$ 为基站在逆时针方向旋转测量扫描光 1 的扫描时间； $t_{2,p}$ 为基站在顺时针方向旋转测量扫描光 2 的扫描时间； $t_{2,n}$ 为基站在逆时针方向旋转测量扫描光 2 的扫描时间。根据基站转台在正、反转测量扫描光的扫描时间，则同步信号延时可表示为

$$\Delta t = \frac{2T - t_{1,p} - t_{1,n} - t_{2,p} - t_{2,n}}{4}. \quad (6)$$

3 同步信号延时模型

wMPS 基于时空转换的思想对封闭圆周所对应的周期时间进行精确细分，可以获得空间上的角度信息。理论上，如果能够对周期时间进行 1296000 份的精确细分，则一份时间单元所对应的角度为 1"，如果基站的旋转周期为 33.3 ms，则可知 1" 的角精度所对应的时间单元为 25.72 ns。补偿前，wMPS 的同步信号延时大于 100 ns，因此需要对同步信号延时进行定量分析并建立数学模型，从而精确补偿延时引入的测角误差。

同步信号延时主要来源于同步光电路信号处理环节和同步光空中飞行环节，其中同步信号的电路延时与零位信号经过同步光电路中主要器件的时间，以及接收器光敏单元的光电转换时间有关，同步信号的飞行延时与发射基站和接收器的空间距离有关^[18]。同步光电路主要是对输入的零位信号进行分频和整形的处理，最终实现同步脉冲激光器的闪烁功能。电路由电源、CPLD 芯片、单稳态触发器、三态缓冲器、脉冲放大器和激光器等部分组成。图 4 为同步光电路的原理框架。

其中电源为 CPLD 芯片、触发器和激光器等器件供电。使用 CPLD 芯片对零位信号进行分频处理，可以有效区分远距离的同步光和扫描光信号。单稳态触发器可以实现对零位信号的脉宽整形，其

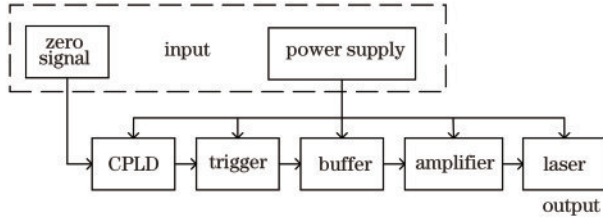


图 4 同步光电路的原理示意图

Fig. 4 Schematic of synchronous optical circuit

输出信号经过三态缓冲器后分为多路并传输至分布在基站周围的激光器模块。脉冲放大器可以进一步对零位信号进行幅值放大,最终触发激光器发射同步脉冲激光。同步信号的电路延时主要包括 CPLD、触发器、缓冲器、放大器、激光器和光电二极管等器件的延迟时间,因此同步信号的电路延时可表示为

$$\Delta t_C = \Delta t_{CPLD} + \Delta t_{TG} + \Delta t_{BF} + \Delta t_{AP} + \Delta t_{LS} + \Delta t_{PD}, \quad (7)$$

式中: Δt_C 为同步信号的电路延时; Δt_{CPLD} 为 CPLD 芯片的延时; Δt_{TG} 为触发器的延时; Δt_{BF} 为缓冲器的延时; Δt_{AP} 为放大器的延时; Δt_{LS} 为激光器的延时; Δt_{PD} 为光电二极管的延时。对 CPLD 芯片中的分频电路进行时序仿真,由仿真波形得到 Δt_{CPLD} 为 38 ns。查阅相关器件的数据手册可知,各器件延时的典型值如表 1 所示。

表 1 相关器件的延时

Table 1 Delay of related devices unit: ns

Trigger	Buffer	Amplifier	Laser	Photodiode
70	18	18	10	13

使用示波器来测量零位信号经过各器件的延时,测量结果如表 2 所示。

从表 1 和表 2 可以看到,实际电路中各器件的延时与数据手册中的典型值相差较小,考虑到电路中由寄生电容和电阻等造成的延时^[19],最终认为 Δt_C 值为 190 ns。

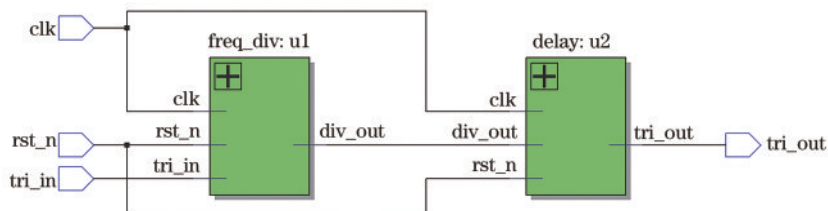


图 5 延时触发电路的原理示意图

Fig. 5 Schematic of delay trigger circuit

表 2 相关器件的延时测量值

Table 2 Delay measurements of related devices

unit: ns			
CPLD	Trigger	Buffer	Amplifier
46	75	24	21

为了研究同步信号的飞行延时与发射基站和接收器空间距离的关系,使用示波器来测量不同距离下码盘输出零位信号和接收器接收同步光信号的延时。改变基站和接收器之间的距离,在 30 m 的距离内每隔 5 m 测量一次,而同步信号的飞行延时与基站和接收器之间的距离符合 $\Delta t_F = s/c$,其中 Δt_F 为同步信号的飞行延时, s 为基站与接收器之间的距离, c 为光在真空中的传播速度。结合(7)式可得到同步信号延时的数学模型为

$$\Delta t = \Delta t_F + \Delta t_C = s/c + 190. \quad (8)$$

4 延时补偿算法

4.1 延时电路设计

同步光电路中应用的 CPLD 芯片为 Intel 公司生产的 MAX 10 系列芯片,该芯片的内部资源丰富,输入输出性能优异,满足工业现场的应用需求。为了研究同步信号延时对测角精度的影响,可人为地增加零位信号经过 CPLD 芯片的延时,从而达到同步信号延时可控的目的,进而观察不同延时下测量角度的波动情况。CPLD 芯片的原电路主要是对零位信号进行二分频处理,在原分频电路的基础上可使用计数器对分频后的零位信号进行计数延迟输出^[20],最终实现延时触发同步信号。设计的延时触发电路原理如图 5 所示,其中 clk 信号为工作时钟信号,rst_n 信号为模块复位信号,tri_in 信号为输入的零位信号,tri_out 信号为经过延时处理后的同步信号,div_out 为信号为经过二分频处理后的零位信号,freq_div:u1 单元为分频电路模块,delay:u2 单元为延时输出模块。

CPLD 芯片的时钟频率为 100 MHz, 其决定延时触发电路的延时精度, 精度可达 10 ns。通过设置计数器的不同阈值来增加零位信号经过

CPLD 芯片的延时, 最终可控地增加同步信号的延迟时间。延时触发电路仿真结果如图 6 所示。

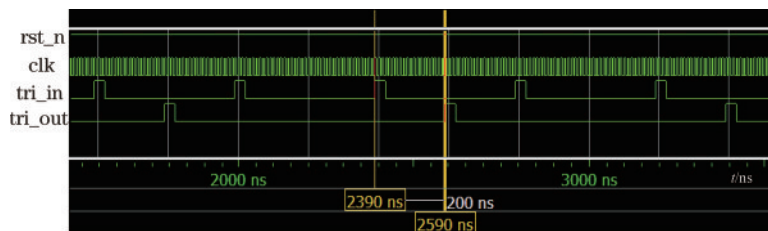


图 6 延时触发电路的仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms of delay trigger circuit

从图 6 可以看到, 同步信号与零位信号之间的延时为 200 ns, 在原有的同步信号延时为 190 ns 的基础上, 延时电路可以实现 10 ns 的延时触发。通过调整 CPLD 芯片的延时, 有助于研究不同延时下测量角度的波动情况。

4.2 补偿算法设计

为了减少同步信号延时引入的测角误差, 设计基于 CPLD 芯片的同步信号延时补偿算法。延时补偿算法根据之前一系列零位信号脉冲的触发时刻来预测下一触发时刻, 将同步信号延时触发至预测的零位信号触发时刻, 从而可以实现同步信号和零位信号的同时触发^[21]。延时补偿算法主要由记录脉冲时刻、预测触发时刻、计算补偿时间和实时延时触发 4 个部分组成, 延时补偿算法的流程如图 7 所示。

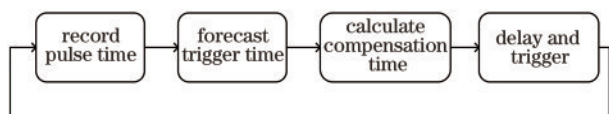


图 7 补偿算法的流程图

Fig. 7 Flowchart of compensation algorithm

为了实现同步信号和零位信号的同时触发, 需记录分频后一系列零位信号脉冲的触发时刻, 以此预测下一个零位脉冲的触发时刻, 结合同步信号的电路延时来计算延时补偿的时间。补偿算法的实现过程: 不断读取零位信号的状态, 当检测到上升沿时, 触发计数器开始计数并且到下一信号上升沿时刻结束, 最终计算相邻两脉冲的周期时间。记录连续三个零位脉冲的触发时刻, 将连续两个周期的平均值作为预测下一零位脉冲触发的时间间隔。根据该时间间隔减去同步信号的电路延时, 可以得到 CPLD 芯片延时触发电路所需要设置的补偿时间, 并对同步信号进行相应的延时触发。在此基础上, 重复记录连续三个零位脉冲的触发时刻, 实时更新预测的零位脉冲触发时刻和补偿时间并延时触发下一同步脉冲激光。

上述过程可以实现对同步脉冲激光的实时延时触发, 经过最初三个旋转周期后, 接收器接收到的同步光信号时刻和码盘输出的零位信号时刻一致, 从而补偿同步信号的电路延时。延时补偿算法的仿真结果如图 8 所示。

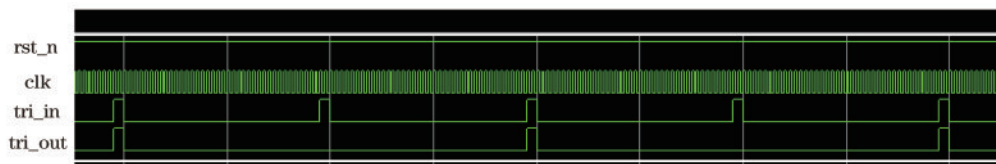


图 8 补偿算法的仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms of compensation algorithm

从图 8 可以看到, 引入补偿算法后, 同步信号与零位信号可以实现同时触发, 说明同步信号的电路延时得到补偿。考虑到发射基站在工作过程中需要调节转台转速, 则仿真模拟过程中改变零位信号

的周期, 仿真结果如图 9 所示。

从图 9 可以看到, 改变基站转速后, 经过 6 个旋转周期后的同步信号可以重新与零位信号同时触发, 说明设计的延时补偿算法能够实现补偿同步信

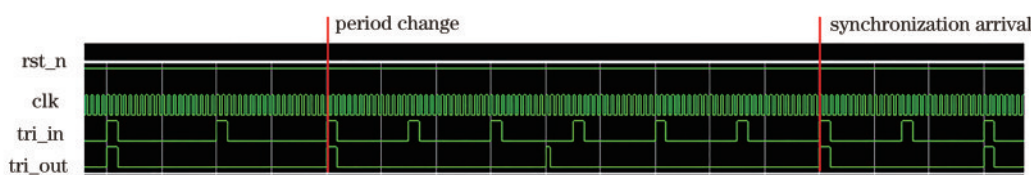


图 9 转速改变的仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms with change of rotation speed

号电路延时的功能。

5 实验与分析

分别将延时触发程序和延时补偿程序烧写至

同步光电路的 CPLD 芯片中并进行如下实验,观察不同延时下测量角度的波动情况和补偿前后同步信号延时的变化情况。实验中 wMPS 发射基站的转速为 1800 r/min,实验场景如图 10 所示。

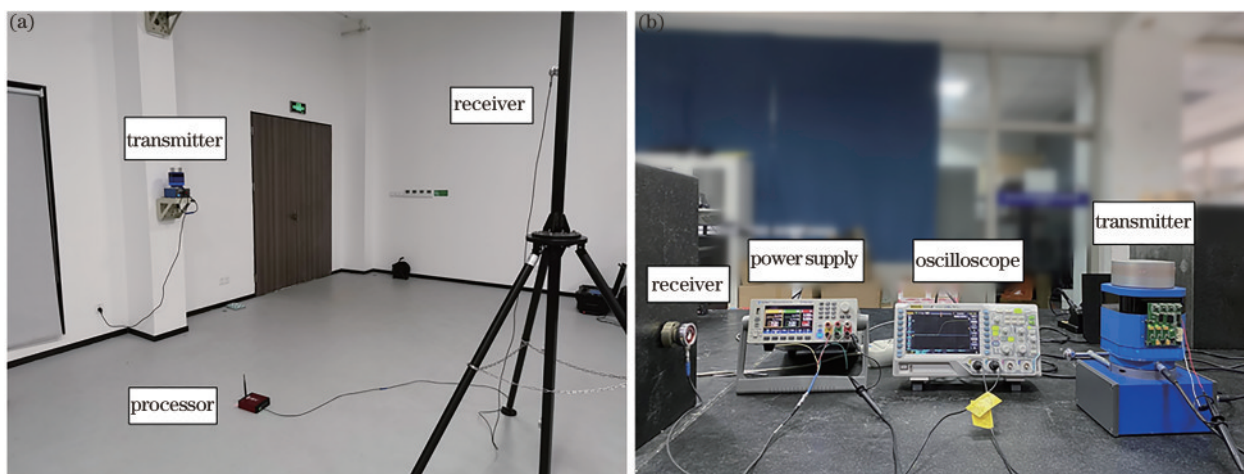


图 10 实验场景。(a)发射站测量接收器;(b)示波器测量信号延时

Fig. 10 Experimental scene. (a) Transmitting station measuring receiver; (b) oscilloscope measuring signal delay

5.1 测角波动实验

在延时触发电路中加入不同延时以研究 CPLD 芯片所加延时和同步信号延时的变化关系。原始同步信号的电路延时为 190 ns,在此基础上,在 CPLD 芯片中分别加入 50, 100, 200, 300, 400, 500, 1000 ns 的延时后触发同步脉冲激光。为了减小飞行延时的影响,保持接收器与基站的距离在 1 m 以内,使用示波器来测量 CPLD 芯片中加入不同延时后的同步信号延时,测试结果如表 3 所示。

从表 3 可以看到,在原始电路延时的基础上,同步信号延时随着 CPLD 芯片中所加延时的线性增加而增加,且同步信号延时的变化量基本与 CPLD 芯片中所加延时相等。在此基础上,继续观察不同延时下 wMPS 测量角度的波动情况,保持接收器的位置不变后对其进行扫描测量,记录不同延时下的 t_1 和 t_2 。对 t_1 和 t_2 进行归一化处理,即 t_i/T ,不同延时下实际测角与理论测角的对比结果如图 11 所示。

表 3 加入延时后的同步信号延时

Table 3 Synchronous signal delay after adding delay

unit: ns

Adding delay	0	50	100	200	300	400	500	1000
Synchronous signal delay	190	236	290	394	496	592	692	1196

从图 11 可以看到,随着同信号延时的增加,测量的扫描时间呈线性减小,在所加延时为 500 ns 处引入的测角误差约为 $3\pi \times 10\exp(-5)$; 相同延时下,实际测量角度与理论角度的极差

为 $2\pi \times 10\exp(-6)$,其处于 wMPS 测角精度的接受范围内,因此可以认为同步信号延时对角度呈线性的影响,测角误差与同步信号延时呈正相关。

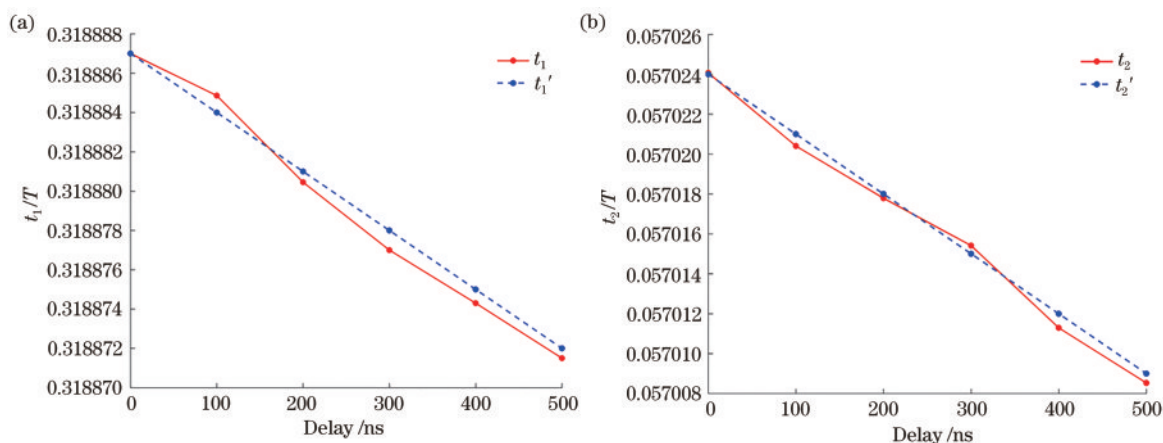


图 11 不同延时下测量时间与理论时间的对比。(a)平面 1;(b)平面 2

Fig. 11 Comparison of measured time and theoretical time under different delays. (a) Plane 1; (b) plane 2

5.2 补偿前后延时对比

将设计的延时补偿程序烧写至 CPLD 芯片中,保持接收器与基站的距离在 1 m 以内,使用示波器

来测量零位信号和同步信号之间的延时,对比引入补偿算法前后的同步信号延时情况。补偿前后的同步信号延时如图 12 所示。

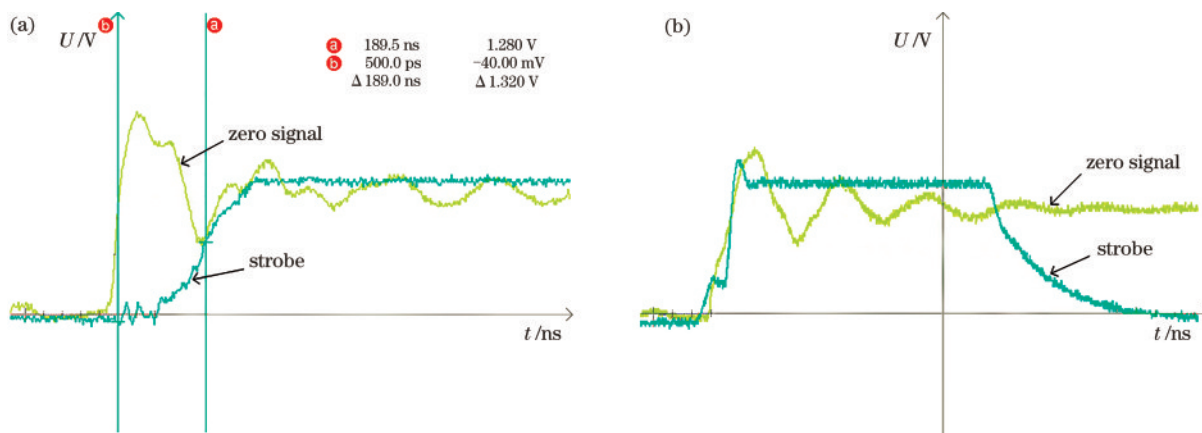


图 12 补偿前后的同步信号延时。(a)补偿前;(b)补偿后

Fig. 12 Synchronous signal delay before and after compensation. (a) Before compensation ; (b) after compensation

从图 12 可以看到,补偿前的零位信号先于同步信号触发,同步信号的延时约为 190 ns;补偿后的同步信号和零位信号可以实现同时触发,说明补偿算法可以补偿同步信号之前的电路延时。为了进一步验证补偿效果,采用正、反转延时评估方法对引入补偿算法前后的同步信号延时进行评估。保持发射基站的位置不变,对距离基站约为 10 m 处的目标点进行正、反转测量,记录引入补偿算法前后的 t_1

和 t_2 (已作归一化处理)。表 4 为补偿前后基站正、反转测量该目标的扫描时间,实验中发射基站的旋转周期为 33.3 ms。

从表 4 可以看到,通过(6)式计算可得,补偿前同步信号延时约为 225 ns,补偿后同步信号延时减小到 33 ns,说明补偿算法可以减小约为 190 ns 的同步信号电路延时,说明补偿算法具有有效性。

表 4 补偿前后的扫描时间

Table 4 Scanning time before and after compensation

Scanning time	t_p		t_n		$t_p + t_n$	
	Original	Correction	Original	Correction	Original	Correction
Plane 1	0.196734	0.196740	0.803253	0.803258	0.999987	0.999998
Plane 2	0.452503	0.452509	0.547483	0.547489	0.999986	0.999998

6 结 论

本课题组研究一种基于发射基站转台正、反转测量目标以评估同步信号延时的方法,并建立同步信号延时的数学模型。研究 CPLD 所加延时与同步信号延时的关系,并研究同步信号电路延时的补偿算法。实验结果表明,同步信号延时随着 CPLD 所加入延时的增加呈等量增加,并且补偿算法能够有效减小同步信号的电路延时。考虑到同步信号飞行延时的存在,这会对后续的坐标解算引入误差。另外,扫描光平面参数和多基站位姿参数的标定都未考虑同步信号延时的影响,未来将重点在接收器的坐标解算和基站内、外参数标定算法中补偿同步信号延时引入的误差。

参 考 文 献

- [1] Pan T Y, Fan B X, Yi W M, et al. Overview of large-scale dynamic measurement metrology [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2015, 38(8): 70-72, 76.
潘廷耀, 范百兴, 易旺民, 等. 大尺寸动态测量技术综述[J]. *测绘与空间地理信息*, 2015, 38(8): 70-72, 76.
- [2] Franceschini F, Galetto M, Maisano D, et al. Distributed large-scale dimensional metrology. New insights [EB/OL]. [2020-06-09]. https://www.researchgate.net/publication/265505143_Distributed_large-scale_dimensional_metrology_New_insights.
- [3] Xiong Z, Zhu J G, Zhao Z Y, et al. Workspace measuring and positioning system based on rotating laser planes[J]. *Mechanika*, 2012, 18(1): 94-98.
- [4] Ren Y, Liu F F, Fu Y X, et al. Placement optimization of laser multilateration network [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 011201.
任瑜, 刘芳芳, 傅云霞, 等. 激光多边测量网布局优化研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 011201.
- [5] Domenico A M, Jafar J, Fiorenzo F, et al. Indoor GPS: system functionality and initial performance evaluation[J]. *International Journal of Manufacturing Research*, 2008, 3(3): 335-349.
- [6] Ren Y J, Zhao X, Guo S Y, et al. Path planning control of automated guided vehicle based on workshop measurement positioning system and fuzzy control[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0312003.
任永杰, 赵显, 郭思阳, 等. 基于 wMPS 和模糊控制的 AGV 路径规划控制[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0312003.
- [7] Fang H G, Guo L J, Yang X H, et al. Modular laser 3-dimensional scanning system based on the rotary-laser theodolite positioning network [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(6): 57-62.
方红根, 郭立杰, 杨晓慧, 等. 旋转激光经纬仪空间定位网络的组合式激光三维扫描系统[J]. *光电工程*, 2016, 43(6): 57-62.
- [8] Guo S Y, Lin J R, Yang L H, et al. Analysis and elimination of common-mode errors in workspace measurement and positioning system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 041201.
郭思阳, 林嘉睿, 杨凌辉, 等. 室内空间测量定位系统共模误差分析与消除[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 041201.
- [9] Muelaner J E, Wang Z Y, Jamshidi J, et al. Study of the uncertainty of angle measurement for a rotary-laser automatic theodolite (R-LAT)[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 2009, 223(3): 217-229.
- [10] Lin J R, Xu X, Ren Y J, et al. Model optimization of scanning laser surface for workshop measurement positioning system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0315002.
林嘉睿, 徐鑫, 任永杰, 等. 室内空间测量定位系统扫描激光面模型优化[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0315002.
- [11] Yang L H. Research on large-scale space coordinate measurement location technology based on optical scanning [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010: 35-43.
杨凌辉. 基于光电扫描的大尺度空间坐标测量定位技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010: 35-43.
- [12] Zhao J, Ren Y J, Lin J R, et al. Study on verifying the angle measurement performance of the rotary-laser system[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(4): 044106.
- [13] Wang J W, Yang L H, Shi S D, et al. Indoor integrated navigation algorithm based on workshop measurement positioning system and lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 101201.
王金旺, 杨凌辉, 史慎东, 等. 基于工作空间测量定位系统和激光雷达的室内组合导航算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 101201.
- [14] Sun F W, Zheng C J, Liu X Z, et al. Design and

- implementation of delay correction module for synchronous signal transmission based on STM32 [J]. *Electronic Design Engineering*, 2019, 27(16): 170-174, 179.
- 孙夫文, 郑采君, 刘昕卓, 等. 基于STM32同步信号传输延时校正模块设计与实现[J]. *电子设计工程*, 2019, 27(16): 170-174, 179.
- [15] Fu T Q, Ma T Y, Wang Y F, et al. GPS/INS delay estimation and delay compensation based on residual reconstruction [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2019, 53(10): 1210-1217.
- 付廷强, 马太原, 王亚飞, 等. GPS/INS 延时估计与基于残差重构的延时补偿算法[J]. *上海交通大学学报*, 2019, 53(10): 1210-1217.
- [16] Yang H T, Zhang L S, Fei Y T, et al. Analysis and evaluation of measurement uncertainty sources for parasitic time grating sensors [J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(18): 2487-2493.
- 杨洪涛, 章刘沙, 费业泰, 等. 寄生式时栅传感器测量不确定度的分析与评定[J]. *中国机械工程*, 2016, 27(18): 2487-2493.
- [17] Tao L, Liu Z G, Lü T, et al. Drift error compensation method of frequency sweeping interferometer by consecutive forward and reverse optical frequency scanning [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0212002.
- 陶龙, 刘志刚, 吕涛, 等. 频率扫描干涉仪漂移误差正反向扫描补偿法[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0212002.
- [18] Wang D M. Analysis method of flight control system delay [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2017, 14(30): 10-11.
- 王冬明. 飞行控制系统延时的分析方法[J]. *科技创新导报*, 2017, 14(30): 10-11.
- [19] Wang W M, Shen X Y, Chen Z B, et al. Inherent delay measurement of infrared range finders simulating test circuit [J]. *Application of Electronic Technique*, 2013, 39(9): 41-43.
- 王伟明, 沈晓彦, 陈志斌, 等. 红外测距仪模拟检测电路固有延时测量研究[J]. *电子技术应用*, 2013, 39(9): 41-43.
- [20] Xie Y L, Jin L N, Chen Z Q. Design and implementation of FPGA based digital delayer [J]. *Video Engineering*, 2013, 37(23): 73-77.
- 谢跃雷, 晋良念, 陈紫强. 一种基于FPGA的数字延迟器的设计与实现[J]. *电视技术*, 2013, 37(23): 73-77.
- [21] Chen Z R, Peng D L, Liu X K, et al. Dynamic modeling for time grating CNC rotary table based on time series [J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(23): 2853-2857.
- 陈自然, 彭东林, 刘小康, 等. 基于时间序列的时栅数控转台动态建模研究[J]. *中国机械工程*, 2011, 22(23): 2853-2857.