

流动卫星激光测距系统的距离选通实现方法

朱建春¹, 李欣^{1,2,3,4*}, 朱威^{2,3,4}

- (1. 防灾科技学院 电子科学与控制工程学院, 河北 廊坊 065201;
2. 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉 430071;
3. 中国地震局地震大地测量重点实验室, 湖北 武汉 430071;
4. 湖北省地震局, 湖北 武汉 430071)

摘要: 现有流动卫星激光测距系统的距离选通模块因硬件架构问题, 有稳定性不高、可靠性不强等不足。由于和固定站的设备互不兼容, 因此需要研制新的距离选通模块, 在兼顾高集成度的同时提升运行稳定性。在基于距离选通与后向散射规避的实现原理基础上, 依靠 ARM、FPGA 嵌入式双核心架构设计全新的距离选通模块。采用人卫激光测距卫星 lageos1、ajisai 和地球同步卫星 compassi3 的星历进行距离门参数拟合等测试。经测试, 该距离门控模块参数拟合误差小于 0.01%, 在 2 kHz 重复频率下单次预期回波时刻计算时间约为 34.365 μ s, 平均后向散射规避点火频率损失率低于 1%, 在 2 kHz 重复频率下距离门分辨率优于 5 ns, 高频率门控信号输出平稳, 并且能够满足 20 kHz 以上的重复频率应用需求, 符合预期结果, 具有实际应用价值。

关键词: 距离选通; 激光测距; 多项式拟合; 高重复频率; 流动观测

中图分类号: P228.5 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220200

Implementation method of range gating for mobile satellite laser ranging system

Zhu Jianchun¹, Li Xin^{1,2,3,4*}, Zhu Wei^{2,3,4}

- (1. School of Electronic Science and Control Engineering, Institute of Disaster Prevention, Langfang 065201, China;
2. Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China;
3. Key Laboratory of Earthquake Geodesy, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China;
4. Hubei Earthquake Administration, Wuhan 430071, China)

Abstract: Due to the problem of hardware architecture, the range gating module of the existing mobile satellite laser ranging system has some shortcomings, such as low stability and low reliability. Since it is incompatible with the equipment of the fixed station, it is necessary to develop a new range gating module to improve the operation stability while giving consideration to high integration. Based on the realization principle of range gating and backscattering avoidance, the new range gating module is designed with ARM and FPGA embedded dual core architecture. The module used the ephemeris of lageos1, ajisai and geosynchronous compassi3 satellites to fit the range gating parameters. The test results show that the parameter fitting error of the range gating module is less than 0.01%, and the calculation time of a single expected echo epoch is 34.365 μ s at repetition rate of 2 kHz. The average firing frequency loss rate due to the backscattering avoidance is less than 1%. The resolution

收稿日期: 2022-03-21; 修订日期: 2022-05-10

基金项目: 湖北省自然科学基金 (2021 CFB314); 中央高校基本科研业务费研究生科技创新基金 (ZY20210310)

作者简介: 朱建春, 男, 硕士生, 主要从事灾害监测技术与仪器方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 李欣, 男, 副研究员, 博士, 主要从事人造卫星激光测距方面的研究。

of range gating is lower than 5 ns at repetition rate of 2 kHz. The output of high frequency gating signal is stable and the module can meet the requirements of repetition frequency applications over 20 kHz. It conforms to the expected results and has practical application value.

Key words: range gating; laser ranging; polynomial fitting; high repetition rate; mobile observation

0 引言

距离选通技术是利用设置脉冲发射端和脉冲接收端的开关时间,使目标反射回来的激光脉冲刚好在接收端选通工作的时间内到达。人造卫星激光测距使用单光子雪崩二极管 (Single Photon Avalanche Diode, SPAD) 接收回波信号,由于背景噪声、后向散射等因素的干扰,系统测距效果被严重影响。采用距离选通这种时间滤波技术可以有效降低虚警概率,提高探测成功概率。该项技术不仅可以应用于人造卫星激光测距 (Satellite Laser Ranging, SLR) 领域,还可以推广到雷达、超声波等领域,在卫星激光测距领域中,距离选通通常被称为距离门或距离门控。

在国外,奥地利的 Graz SLR 站最早实现了高重复率激光卫星观测,他们基于现场可编程逻辑门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 设计了满足 2 kHz 重复率的距离门电路^[1-3]。国内,中国科学院上海天文台、中国科学院云南天文台等都是基于 FPGA 并配合上位机计算机的方式设计了高精度距离门控电路^[4],他们将主回波实时识别处理部分都放在上位

机^[5]中执行。中国地震局地震研究所于 2011 年首次成功研制出世界口径最大的流动卫星激光测距系统 TROS1000。为了照顾到 TROS1000 的狭小运行空间的需求,专门为其研制的 All-in-One 控制系统包含时间频率标准、时间测量、距离选通、转台伺服、气象参数采集、网络通讯等众多功能。系统虽然具有高耦合、低内聚的特点,但也不可避免地出现某些功能稳定性较低的不足。比如,在实际工作过程中,因为别的模块原因,导致距离选通模块突然不工作,而造成卫星测距不连续,数据质量变差。鉴于 TROS1000 与固定站的系统互不兼容,无法直接使用固定站的距离选通模块,文中提出全新的 TROS1000 距离选通模块设计思路,在兼顾对设备安装空间要求的同时,解决距离选通模块工作不稳定的不足。

1 距离门控实现原理

对于千赫兹流动激光测距系统,激光飞行时间将大于激光脉冲发射间隔,所以低频率测距使用的直接计数法已经不能满足测距需要^[6-7],图 1 为距离选通

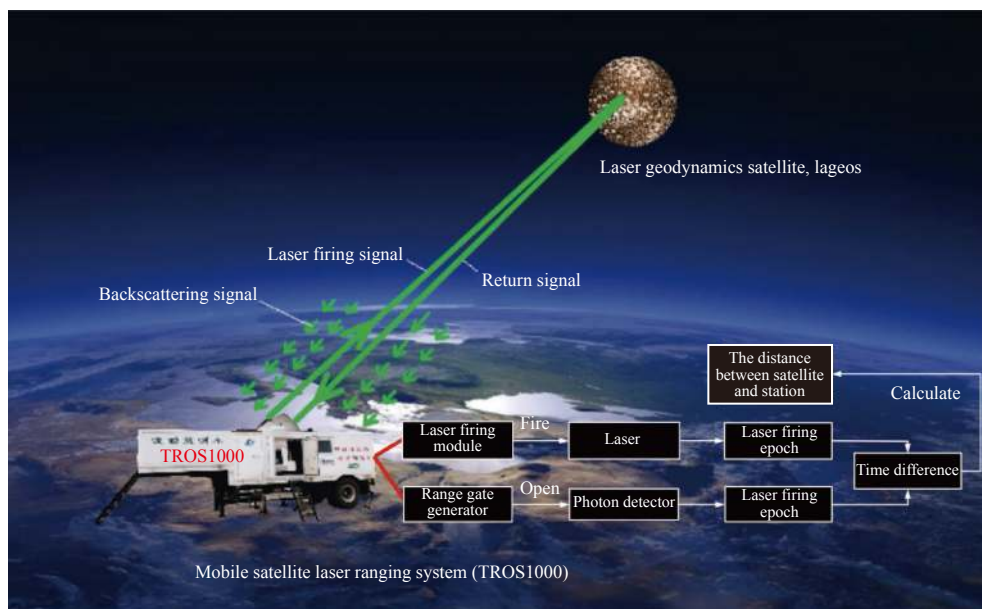


图 1 距离选通在卫星激光测距领域中的应用

Fig.1 Application of range gating in satellite laser ranging field

在卫星激光测距领域中的应用示意图。

图 2 为距离门示意图, 图中, t_i 为激光发射时刻, T_i 为 t_i 对应的距离门控输出时刻, r 为激光发射间隔, t_{Δ} 为激光发射时刻和其对应的距离门控输出时刻之间的时间差。当激光发射时, 系统记录下激光发射时刻, 并根据当前星历信息拟合出预期回波到达时刻, 然后在预期回波到达前发出距离门控信号打开 SPAD 接收回波。通过距离门时序图可以看出, 激光发射间

隔 r 小于激光发射时刻和距离门控输出时刻之间的差值, 当上一个激光脉冲的回波还未返回时, 下一个激光脉冲已经发射了, 所以使用直接计数法会引起数据遗漏或硬件资源浪费, 对此需要新的计数方法: 将计算出的每次距离门控输出时刻放入内存中, 在当前时刻到达距离门控输出时刻时发出距离门控信号, 把距离门控时刻看成事件^[8-11], 这样就可以实现高重复率的人卫激光测距。

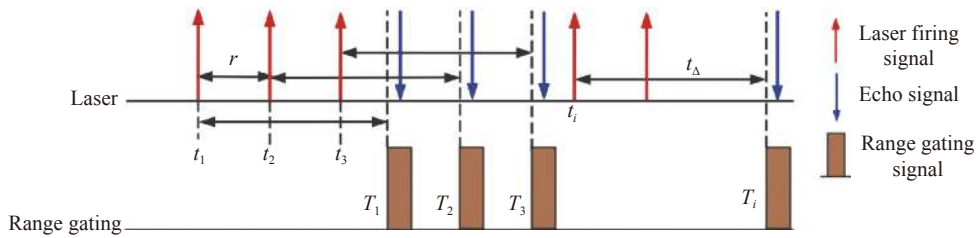


图 2 距离门示意图

Fig.2 Schematic diagram of range-gate

考虑到 FPGA 拥有丰富的知识产权 (Intellectual Property, IP) 核资源和布线资源, 可以采用通过当前时刻和预期回波时刻匹配的方法输出门控信号^[12-13]。基本原理是: 当激光发射时, 系统记录下当前时刻, 将预期回波时刻与当前时刻相比较, 当两者匹配时发出距离门控信号。

2 距离门控算法

卫星激光测距在经过多年的发展之后, 其定轨和预报的精度已经达到米级, 而对于一些形状比较规整的目标定轨精度可以达到厘米级, 这为提高距离门的精度提供了有利条件^[14]。距离门控的计算实际上就是通过计算机对目标卫星的轨道进行预报, 并根据预报结果计算出激光在观测站和卫星之间的飞行时间, 从而确定单光子信号探测器的打开时刻, 进而准确地接收回波。由于预报过程中需要不断地更新数据, 导致数据传输以及计算本身都需要面对巨大压力。

为此, 在官方预报的星历中通常按一定时间间隔给出在地固坐标系下的卫星坐标来减少数据量^[15], 例如, 卫星 ajisai 的星历每 30 s 给出一组坐标, 卫星 lageos1 的星历每 60 s 给出一组坐标, 卫星 glonass105 的星历每 900 s 给出一组坐标, 但是, 按间隔给出的预报时刻数量无法满足测距的要求, 所以在获得预报数据后,

还需利用多项式拟合的方法, 拟合出预报间隔内公的距离门长度, 这样才能达到高频率激光测距所需要的预报数量, 多项式的一般形式如公式 (1) 所示:

$$y = p_0x^n + p_1x^{n-1} + p_2x^{n-2} + p_3x^{n-3} + \dots + p_n \quad (1)$$

考虑到拟合多项式阶数过大会增大计算量且拟合精度过高, 而拟合多项式阶数越小虽计算量较小, 但会导致拟合精度有限等问题, 综上考虑, 文中选用最高次数为二次的多项式进行拟合, 即每次使用三个参数为一组进行拟合, 每个式子形式如公式 (2) 所示:

$$R_i = p_{j2}(t_i - t_0)^2 + p_{j1}(t_i - t_0) + p_{j0} \quad (2)$$

式中: t_0 为每组计时零点; t_i 为星历给出的每组卫星坐标对应的时刻值; R_i 为星历给出的 t_i 时刻卫星与测距台站之间的距离; 经过计算求出每组数据对应的系数 p_{j0}, p_{j1}, p_{j2} 。然后将求得的三个系数反代入公式 (2), 根据激光发射时刻值即可求得对应的台站与卫星之间的距离值 R_i , 其中 j 表示第 j 组系数, i 表示星历提供的第 i 个预报时刻。此外, 考虑到开启延时和稳定性等因素, 所以还需减去一个提前开启量^[16]。

3 后向散射规避原理

激光发射后, 部分光子会被低空大气散射回到接收器视场内形成接收盲区。在高重复率卫星激光测距中, 回波信号十分微弱, 很容易淹没在后向散射的

干扰信号中,导致回波信号接收失败。后向散射的干扰范围一般为百微秒量级^[17-20],激光返回时间则在毫秒量级以上,所以在低频率激光测距中后向散射不会对测距形成干扰。但在高频率激光测距中,点火、回波信号是相互交错的,所以后向散射会对回波接收造成严重影响。根据最早实现高重复率卫星激光测距的 Graz 站估计,假如后向散射影响时间是 200 μs

时,1 kHz 重复率下系统回波损失将达到 20%,在 2 kHz 重复频率下回波损失将达到 40%^[21]。后向散射的规避是卫星激光测距中的重要部分,目前各个台站普遍采用点火延迟的方式规避后向散射干扰,以 ajisai 卫星(轨道高度 1485.9~1503.7 km)的后向散射规避为例,图 3 所示为其后向散射规避示意图(1 kHz 重复频率)。

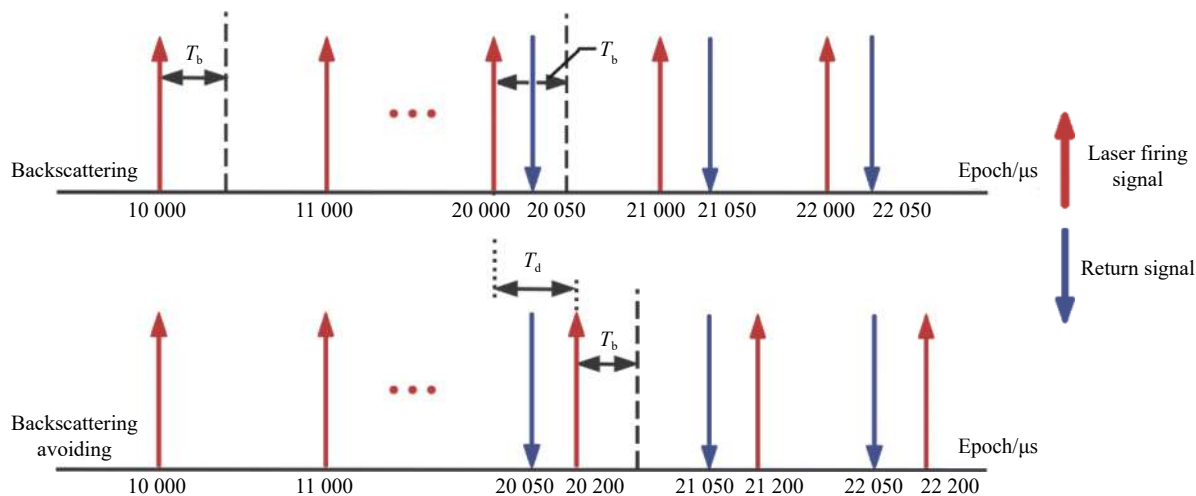


图 3 ajisai 卫星后向散射规避示意图

Fig.3 Schematic diagram of ajisai satellite backscattering avoidance

后向散射规避的原理是防止在每次激光发射后的几百微秒内(该范围是后向散射影响区,无法接收到有用的回波信号)有之前发射的激光回波正好反射到达接收端。点火延迟法就是在该次激光实际发射前,事先判断是否有回波信号在该次激光点火的后向散射干扰区域内到达,如果没有则正常点火,如果有,则延迟该次激光点火时刻直至受影响的回波信号接收完毕后再发出点火信号,这样就可以保证回波被正常接收。由于当前以 1 kHz 重复频率为例,所以点火间隔为 1000 μs ,由 ajisai 卫星轨道高度计算可知,激光发射后 10000 μs 左右回波到达。图中, T_b 是后向散射影响范围, T_d 是点火信号延迟长度,在以 ajisai 卫星为代表的低轨卫星中, T_b 为百微秒量级, T_d 一般为几百微秒^[17],为了方便表示,此处后向散射影响范围 T_d 取 200 μs ,点火信号向后延迟 200 μs 。对于不同的轨道高度和大气能见度, T_b 和 T_d 会有所变化^[22]。点火延迟法原理简单,实现容易,但由于部分激光被延迟发射,导致系统的点火频率略微降低,从而相较

于之前会损失一点回波个数。文中将后向散射规避电路集成在了距离门控电路上用于规避该散射的干扰。

4 硬件实现

目前,随着专用集成电路的不断发展与完善,FPGA 具有实时性好、布线资源丰富、可重复编程等优点。考虑到模块的灵活性与实时性等方面,加入进阶精简指令集机器(Advanced RISC Machine, ARM)芯片,充分发挥两种芯片的优势,使用 ARM、FPGA “双核心”架构设计一种满足流动卫星激光测距要求的距离门控电路。

距离门控实现框图如图 4 所示,ARM 用于多项式拟合与预期回波时刻的计算,FPGA 用于产生基准时钟、存储预期回波时刻、比较预期回波时刻和产生距离门控信号。

FPGA 中的锁相环(Phase Locked Loop, PLL)可以将系统时钟倍频至 200 MHz,用来作为整个模块的基准时钟,时钟分辨率达到 5 ns。为了保证实时性,ARM

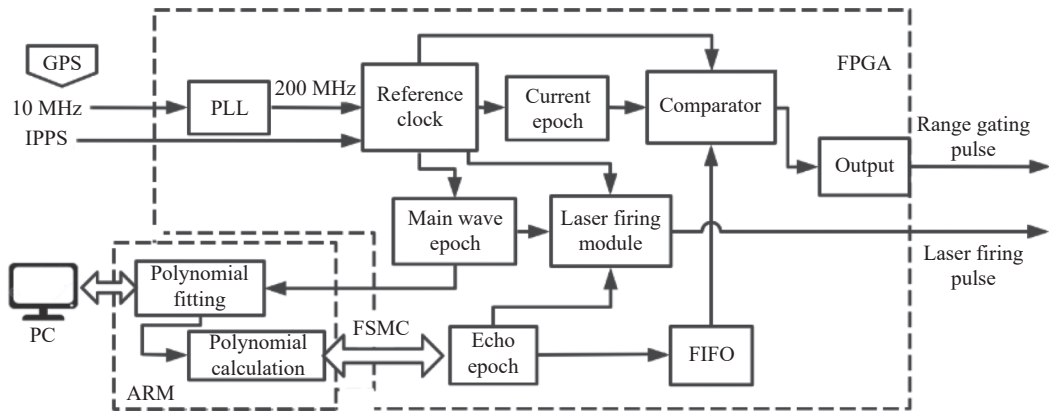


图 4 距离门控实现框图

Fig.4 Block diagram of range gating generator

与 FPGA 之间依靠可变静态存储控制器 (Flexible Static Memory Controller, FSMC) 总线吞吐大量数据, 该总线的传输速度最高可达 48 Mbps, 满足高频率激光测距的要求。

卫星激光测距领域使用国际激光测距服务 (International Laser Ranging Service, ILRS) 的官方预报星历综合预报格式 (Consolidated Prediction Format, CPF) 文件, 该文件包括文件头、数据记录和结束三部分, 其中数据记录部分每一行代表一定的时间间隔, 给出观测对象的空间位置等状态参量, 所以使用该星历可通过插值计算求得目标历元的状态量。根据距离门控算法中提出的二阶多项式拟合算法的设计策略, 每次

使用三个参数参与计算, 因此, 观测计算机在星历中按时间顺序连续选取三行状态参量作为一组连同台站坐标一起发送给 ARM, ARM 拟合完的参数用于计算预期回波时刻。FPGA 根据主波探测器记录激光发射时刻, 并将其发送给 ARM。ARM 根据当前时刻的拟合参数和激光发射时刻计算出对应的预期回波时刻, 按顺序存入 FPGA 内部生成的先入先出队列 (First Input First Output, FIFO) 中。预期回波时刻被取出放入比较器与当前时刻比较, 一致时发出一个门控信号打开 SPAD 接收回波^[7]。新设计的距离门控电路集成了后向散射规避功能, 通过激光点火模块控制激光器发射激光的时刻。距离门控实现路线图如图 5 所示。

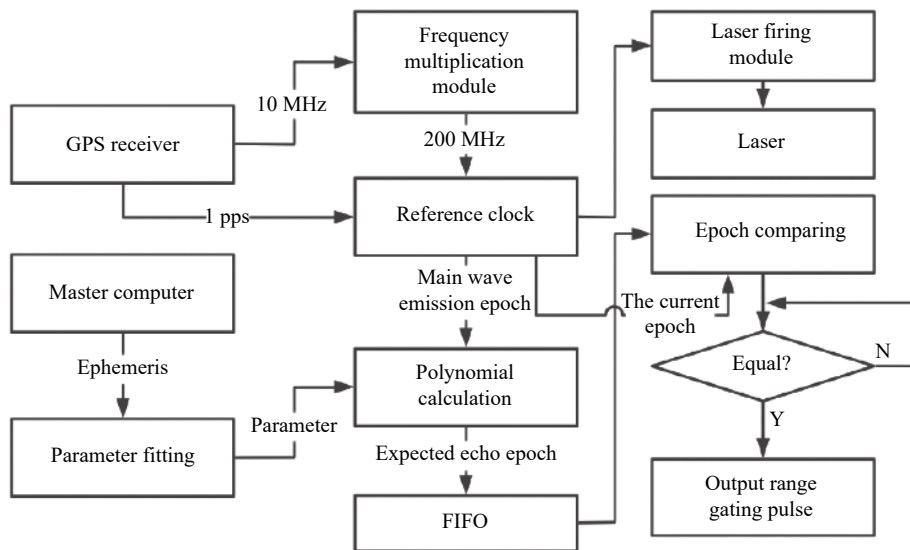


图 5 距离门控实现路线图

Fig.5 Technology roadmap of range gating

5 测试结果分析

考虑到实际应用场景,对距离门控模块进行模拟测试,测试下位机平台为基于一片 STM32 F4 系列芯片 (ARM 核心) 和一片 CylconeIV 系列芯片 (FPGA 核心) 搭建的距离门控电路,使用逻辑分析仪对电路工作情况进行采样后在上位机计算机显示。

实验通过 FPGA 产生固定频率脉冲模拟激光发射,其中, FPGA 和 ARM 之间采用 FSMC 通信,用于高速传输激光发射时刻和预期回波时刻,观测计算机通过串行总线与距离门控模块通信,用于星历坐标、台站坐标的输入和测试结果的显示。通过逻辑分析仪对信号进行采样,并对其验证分析。硬件测试连接图如图 6 所示。

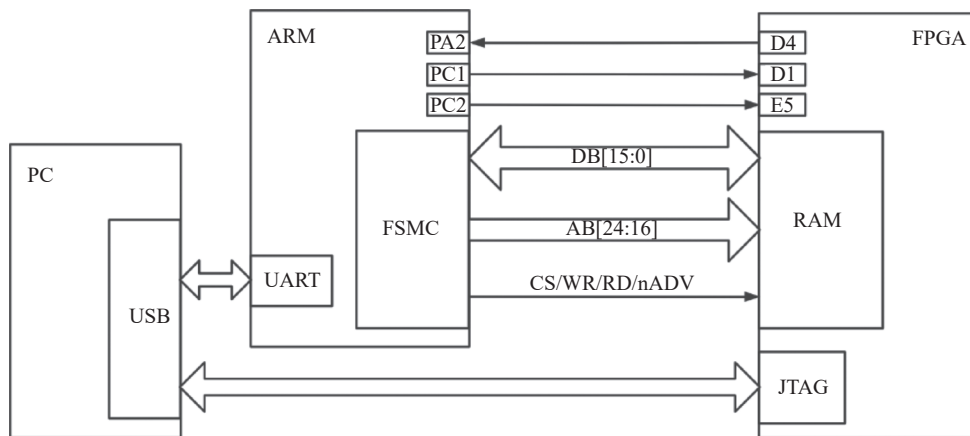


图 6 硬件测试连接图

Fig.6 Diagram of hardware connection for testing

5.1 拟合精度结果分析

模块每三组参数拟合一次,多项式拟合的过程就是求 p_0, p_1, p_2 三个参数的过程, p_0, p_1, p_2 三个参数作为系数参与每次激光预期回波时刻的多项式计算,所以, p_0, p_1, p_2 三个参数的准确度是整个拟合过程的关键点,拟合的准确度直接影响着最后的距离门控信号输出时刻的准确度。为了验证拟合效果,选用了三颗不同轨道高度的 ajisai 卫星 (1485.9~1503.7 km)、lageos1 卫星 (5860~5960 km) 和 compassi3 地球同步卫星 (37790.2 km) 的实际星历数据进行拟合实验,拟合精

度分析实验图如图 7 所示,拟合结果对比如表 1 所示。

由表 1 可知,在三颗卫星各选取的十组数据里,实测拟合值与理论拟合值十分接近,实测拟合值通过下位机芯片计算得到,理论拟合值由上位机计算机计算得到。每个参数的误差为对应的实测拟合值减去理论拟合值,再根据样本标准差的计算公式 $S = (\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n - 1)^{1/2}$ 分别求出三颗卫星的拟合误差样本标准差,即为拟合精度。其中, n 为样本个数, x_i 为每个参数的误差, \bar{x} 为参数的误差平均值。经计算, lageos1 拟合结果误差为 0.001997%, ajisai 拟合结

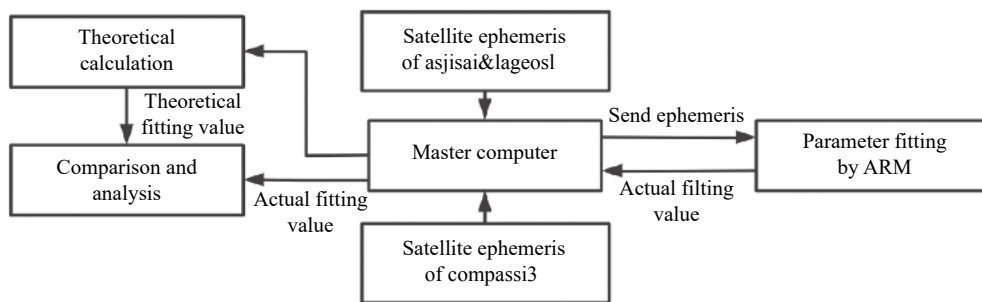


图 7 拟合精度分析实验图

Fig.7 Experimental chart of fitting precision analysis

表 1 lageos1 卫星、ajisai 卫星和 compassi3 卫星拟合结果对比
Tab.1 Comparison of fitting results of lageos1, ajisai and compassi3 satellites

Group	Fitting parameters	lageos1		ajisai		compassi3	
		Theoretical fitting value	Actual fitting value	Theoretical fitting value	Actual fitting value	Theoretical fitting value	Actual fitting value
1	p_0	12 246 910.77	12 246 910.77	7 866 493.98	7 866 493.98	42 388 583.21	42 388 583.21
	p_1	-23.797 102 532	-23.797 123	-4.807 358 846	-4.807 383	-2.133 913 994	-2.133 917
	p_2	0.002 695 052	0.002 655	-0.000 652 222	-0.000 652	-0.000 601 398	-0.000 601
2	p_0	12 242 715.62	12 242 715.62	7 866 056.24	7 866 056.24	42 386 175.97	42 386 175.97
	p_1	-22.801 517 445	-22.801 567	-4.914 551 171	-4.914 567	-3.214 461 718	-3.214 467
	p_2	0.003 110 283	0.003 111	-0.000 310 122	-0.000 310	-0.000 593 678	-0.000 594
3	p_0	12 238 713.09	12 238 713.09	7 865 611.63	7 865 611.63	42 382 802.64	42 382 802.64
	p_1	-21.657 421 675	-21.657 433	-4.959 844 197	-4.959 833	-4.280 358 88	-4.280 350
	p_2	0.003 508 974	0.003 508	0.000 037 866 8	0.000 038	-0.000 583 463	-0.000 584
4	p_0	12 234 929.37	12 234 929.37	7 865 165.76	7 865 165.76	42 378 478.42	42 378 478.42
	p_1	-20.370 883 13	-20.370 850	-4.942 574 962	-4.942 633	-5.327 123 541	-5.327 133
	p_2	0.003 888 814	0.003 828	0.000 383 503	0.000 384	-0.000 570 796	-0.000 571
5	p_0	12 231 389.49	12 231 389.49	7 864 724.24	7 864 724.24	42 373 222.52	42 373 222.52
	p_1	-18.948 802 236	-18.948 832	-4.863 308 719	-4.863 317	-6.350 358 818	-6.350 400
	p_2	0.004 248 104	0.004 250	0.000 720 587	0.000 721	-0.000 555 738	-0.000 556
6	p_0	12 228 117.17	12 228 117.17	7 864 292.57	7 864 292.57	42 367 058.04	42 367 058.04
	p_1	-17.398 676 98	-17.398 653	-4.723 849 386	-4.723 800	-7.345 782 716	-7.345 750
	p_2	0.004 584 425	0.004 585	0.001 041 787	0.001 041	-0.000 538 352	-0.000 538
7	p_0	12 225 134.71	12 225 134.71	7 863 876.05	7 863 876.05	42 360 011.91	42 360 011.91
	p_1	-15.728 883 909	-15.728 876	-4.527 048 447	-4.527 033	-8.309 222 925	-8.309 267
	p_2	0.004 895 88	0.004 897	0.001 340 325	0.001 340	-0.000 518 728	-0.000 519
8	p_0	12 222 462.84	12 222 462.84	7 863 479.64	7 863 479.64	42 352 114.7	42 352 114.70
	p_1	-13.948 542 867	-13.948 517	-4.277 132 092	-4.277 150	-9.236 671 378	-9.236 650
	p_2	0.005 180 277	0.005 179	0.001 613 631	0.001 614	-0.000 496 926	-0.000 497
9	p_0	12 220 120.58	12 220 120.58	7 863 107.93	7 863 107.93	42 343 400.58	42 343 400.58
	p_1	-12.067 513 153	-12.067 517	-3.978 909 34	-3.978 917	-10.124 255 34	-10.124 233
	p_2	0.005 435 328	0.005 435	0.001 858 081	0.001 858	-0.000 473 061	-0.000 473
10	p_0	12 218 125.1	12 218 125.10	7 862 765.01	7 862 765.01	42 333 907.08	42 333 907.08
	p_1	-10.096 478 712	-10.096 483	-3.637 756 603	-3.637 767	-10.968 274 52	-10.968 250
	p_2	0.005 658 921	0.005 660	0.002 068 647	0.002 069	-0.000 447 229	-0.000 447

果误差为 0.001 600%，com-passi3 拟合结果误差为 0.001 303%。模块拟合精度误差小于 0.01%，在下位机中拟合的目标可行，达到流动卫星激光测距的要求。

5.2 测距可行性分析

实时性一直是高频率激光测距的一项重要指标，在每秒发出千次甚至万次脉冲的情况下，对于计算用时的把握直接关系到激光测距能否成功。模块中 ARM 芯片用于参数拟合、上位机通信和计算预期回波时刻。计算预期回波时刻的计算时长是否能够满

足高频率距离门控模块对于时序方面的要求，还需要进行验证分析。实验中 ARM 芯片开始进行预期回波时刻计算时拉高通用输入输出 (General Purpose Input Output, GPIO) 端口，结束预期回波时刻计算时拉低 GPIO 端口，利用 FPGA 的逻辑分析仪可以观察到一次完整的预期回波时刻计算时间，结果如图 8 所示。

可以看出：基准时刻开始于 8C49h，结束于 A722h，总共持续 6874 个时钟周期，约为 34.365 μ s。当前模

拟激光发射频率为 2 kHz, 基准时钟频率为 200 MHz, 即每十万个基准时钟周期发射一次脉冲, 所以不会与下一次激光发射相冲突, 经过计算, 激光来回于台站

与卫星的时间达到百万个时钟周期以上, 所以该模块可以实现 2 kHz 频率以上的激光测距, 理论上可以满足 20 kHz 以上的观测频率。

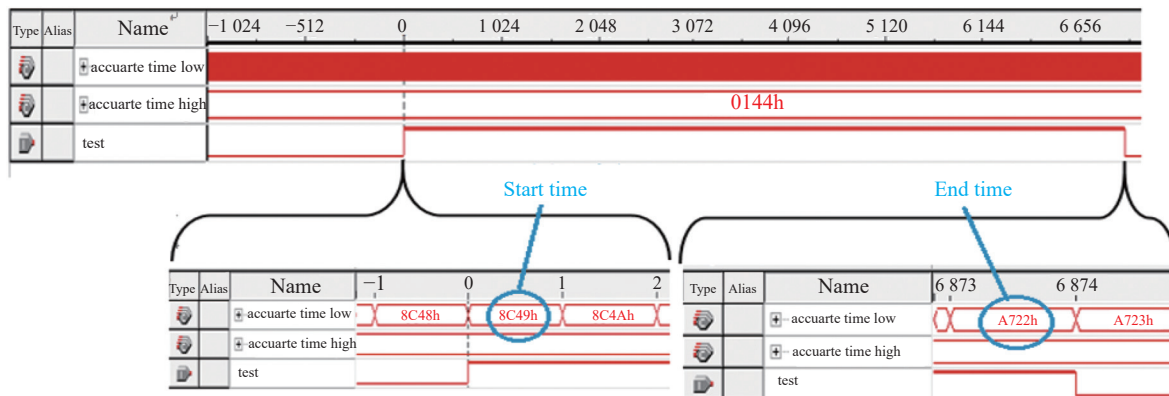


图 8 激光脉冲处理时间分析

Fig.8 Analysis of laser pulse processing time

5.3 距离门控输出测试

预期回波时刻与当前时刻在 FPGA 内部的比较器中进行比较, 当预期回波时刻等于当前时刻时输出

距离门控信号, 距离门发生器 (Range Gate Generator, RGG) 输出门控信号时序如图 9 所示。

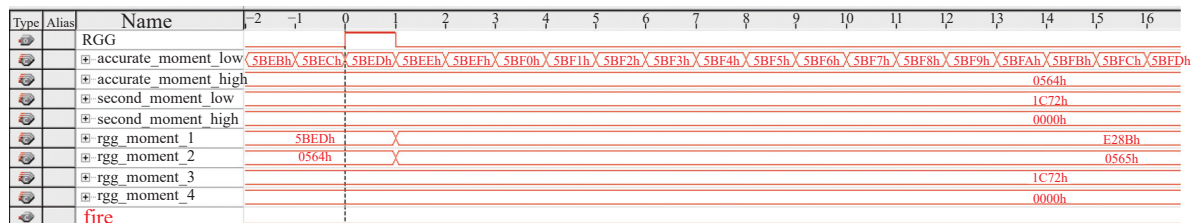


图 9 门控信号输出时序

Fig.9 Output sequence of RGG

由于受到 FSMC 总线位数 (16 位) 的限制, 设计中的预期回波时刻与当前时刻分别由两组四个 16 位计数器组成的 64 位计数表示, 其中, 两个 16 位计数器组成的高 32 位计数代表“粗”计数, 两个 16 位计数器组成的低 32 位计数代表“细”计数。图中, RGG 为距离门控输出, rgg_moment1 与 rgg_moment_2 组成预期回波时刻“细”计数, rgg_moment3 与 rgg_moment_4 组成预期回波时刻“粗”计数, accurate_moment_low 与 accurate_moment_high 组成当前时刻“细”计数, second_moment_low 与 second_moment_high 组成当前时刻“粗”计数, 当预期回波时刻与当前时刻一致时, 输出距离门控信号。图中连续两个预期回波时刻“粗”计数都

为 1C72h, “细”计数分别为 5645BEDh 和 565E28Bh, 计算得到两次时刻相差 499990 ns。以上实验结果满足 2 kHz 重复频率的距离门控间隔为 500000 ns 的要求, 表明距离门控模块能够产生连续稳定的 RGG 信号。

5.4 后向散射规避点火频率测试

由于被测卫星离观测台站的距离太过遥远, 卫星激光测距接收的信号十分微弱, 仅有单光子数量级, 这也导致单次激光的回波接收成功率较低。高重复频率激光测距的诞生就是为了通过增大激光发射次数来提高总体接收到的激光回波次数, 这也说明激光发射 (点火) 频率对于高频率激光测距系统而言是十

分重要的,点火频率的下降也会导致回波接收数量下降。文中通过点火延迟法对后向散射干扰进行自动规避,由于部分点火信号需要规避后向散射的影响而被延迟,所以在单位时间内的实际激光发射次数会相较于原来激光发射次数有所下降。故需要对实际激光发射次数进行测量,以此判断经过后向散射规避延迟后,单位时间内系统的实际点火次数是否损失过多。单位时间(1 s)点火损失次数为不进行后向散射规避时的每秒点火次数(理论点火次数)与进行后向散射规避时的每秒实际点火次数(实际点火次数)之间的差值,点火频率损失率为每秒点火损失次数与每秒理论点火次数的比值。测试采用 ajisai 卫星星历在 2 kHz 重复率(每秒理论点火 2 000 次)下的模拟测试,在距离门控模块正常运行过程中按 1 s 为间隔对实测点火次数进行连续 20 s 采样,并计算每秒点火损失次数和点火频率损失率。后向散射规避点火频率测试结果如表 2 所示。

表 2 中列举了系统在每秒内的实际点火次数、每秒点火损失次数和点火频率损失率,其中,每秒点火损失次数通过理论点火次数(2 kHz)减去实际点火次数得到,点火频率损失率通过每秒点火损失次数除以理论点火次数(2 kHz)得到。点火频率损失率反映了由点火延迟法造成的点火数量损失对系统总体回波接收数量的影响程度。结果表明,文中后向散射自动规避电路在模拟运行中起到了精确规避作用,在对 ajisai 卫星的测试中平均点火损失率仅不到 1%,系统点火频率损失小,并不会对系统最后的回波数据量造成明显影响,所以文中后向散射规避功能满足预期要求。

表 2 后向散射规避点火频率测试结果

Tab.2 Test results of firing frequency of backscattering avoidance

Second	Actual firing times	Number of firing loss	Loss rate of firing
1	1 984	16	0.80%
2	1 986	14	0.70%
3	1 985	15	0.75%
4	1 986	14	0.70%
5	1 984	16	0.80%
6	1 986	14	0.70%
7	1 985	15	0.75%
8	1 986	14	0.70%
9	1 985	15	0.75%
10	1 986	14	0.70%
11	1 984	16	0.80%
12	1 986	14	0.70%
13	1 985	15	0.75%
14	1 986	14	0.70%
15	1 985	15	0.75%
16	1 986	14	0.70%
17	1 984	16	0.80%
18	1 986	14	0.70%
19	1 985	15	0.75%
20	1 986	14	0.70%

5.5 距离门信号分辨率测试

距离门信号分辨率测试采用 AMS 公司的 GPX2 评估板作为测量装置,评估板使用 TDC-GPX2 芯片作为测量核心,在双通道高分辨率工作模式下,可以在 5 ns 脉冲间距下达到 10 ps 均方根(Root Mean Square, RMS)的最大分辨率^[23]。GPX2 评估板计算距离门控信号产生时刻与距离门控信号输出时刻的差值,差值的变化范围反映了距离门控信号的抖动范围,即是距离门控信号的分辨率。图 10 为距离选通模块分辨率

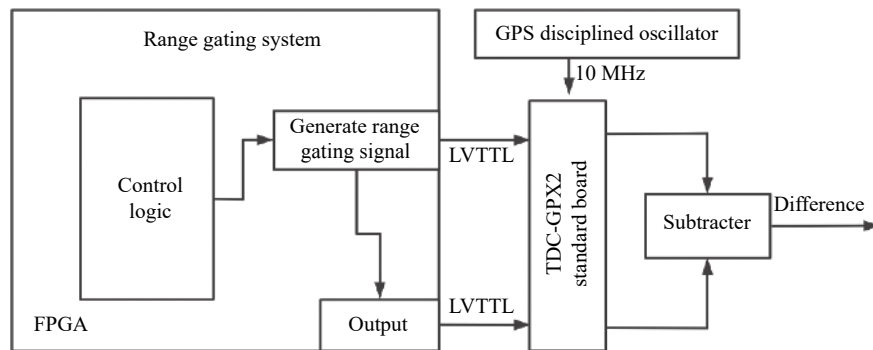


图 10 距离选通模块分辨率测量实验图

Fig.10 Experimental diagram of resolution measurement of range gating module

测量实验图,实验采用 ajisai 卫星轨道进行预报,在 2 kHz 频率下测试结果如表 3 所示。

图 11 是距离门信号抖动结果, X 轴为测试选取的点数, Y 轴为距离门信号输出时刻与产生时刻的差

值。差值最大值为 37.84 ns, 差值最小值为 35.36 ns, 差值的峰峰值为 2.48 ns。图 11 显示距离门的分辨率优于 5 ns, 说明新的距离选通模块硬件设计是可行的, 能够实现高重复率激光测距的连续观测。

表 3 距离门信号抖动测试结果

Tab.3 Test results of range-gate signal jitting

Points	Range gating output epoch/s	Range gate generation epoch/s	Difference/s
1	20 778.023 142 670 39	20 778.023 142 634 26	0.000 000 036 13
2	20 778.023 642 780 37	20 778.023 642 744 27	0.000 000 036 10
3	20 778.024 142 890 25	20 778.024 142 854 16	0.000 000 036 09
4	20 778.024 643 000 07	20 778.024 642 963 97	0.000 000 036 10
5	20 778.025 143 109 89	20 778.025 143 073 78	0.000 000 036 11
6	20 778.025 643 220 89	20 778.025 643 184 77	0.000 000 036 12
⋮	⋮	⋮	⋮
5 745	20 780.895 774 510 81	20 780.895 774 474 33	0.000 000 036 48
5 746	20 780.896 274 619 40	20 780.896 274 582 89	0.000 000 036 51
5 747	20 780.896 774 728 37	20 780.896 774 691 87	0.000 000 036 50
5 748	20 780.897 274 838 47	20 780.897 274 801 85	0.000 000 036 62
5 749	20 780.897 774 943 98	20 780.897 774 907 76	0.000 000 036 22
5 750	20 780.898 275 054 15	20 780.898 275 017 57	0.000 000 036 58

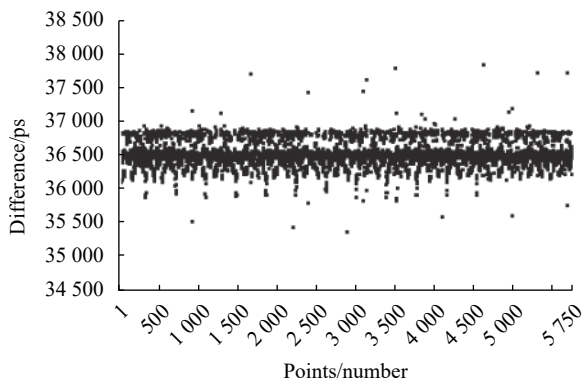


图 11 距离门信号抖动结果

Fig.11 Result of range-gate signal jitting

优的性能。文中详细介绍了距离门控实现原理和距离门控算法,并根据人卫激光测距常用典型轨道的 lageos1 卫星、ajisai 卫星和地球同步卫星 (compassi3) 的星历进行距离门各项性能的测试。测试结果表明,新的距离选通模块参数拟合精度误差小于 0.01%, 单次激光脉冲处理时间达到 34.365 μ s, 后向散射干扰规避点火频率损失低于 1%, 距离门分辨率优于 5 ns, 门控信号输出平稳, 各性能指标均达到固定卫星激光测距台站标准^[4], 所以文中设计的距离选通模块可以应用在流动卫星激光测距系统的高重复频率实际观测当中。

6 结 论

为了缓解目前流动卫星激光测距系统在野外环境下距离选通模块工作稳定性较低的问题,文中设计了一种适用于流动激光测距的距离选通实现方法,在兼顾 TROS1000 对设备安装空间的要求下,提升了距离选通模块的稳定性。该模块采用 ARM+FPGA 架构,充分利用了 ARM 芯片的接口资源和突出的数据处理能力、FPGA 的并行能力和稳定性,以此达到更

参考文献:

[1] Iqbal F, Kirchner G, Koidl F. Fast response, medium resolution digital event timer and range gate generator for satellite laser ranging [J]. *Artificial Satellites*, 2008, 43(4): 143-149.

[2] Wang Peiyuan, Steindorfer M A, Koidl F, et al. Megahertz repetition rate satellite laser ranging demonstration at Graz observatory [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 937-940.

[3] Zhang Haifeng, Long Mingliang, Deng Huarong, et al. Development and application for ground-based space debris

- laser ranging (Invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(11): 1149004. (in Chinese)
- [4] Wu Zhibo, Zhang Zhongping, Chen Juping. The implementation of range-gate control circuit with high-repetition-rate based on FPGA [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(4): 919-922. (in Chinese)
- [5] Zhang Zhongping, Zhang Haifeng, Wu Zhibo, et al. KHz repetition satellite laser ranging system with high precision and measuring results [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56: 1177-1183. (in Chinese)
- [6] Li Xin, Wang Peiyuan, Zou Tong, et al. Experiment on kHz laser ranging at Wuhan satellite laser ranging station [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(2): 367-370. (in Chinese)
- [7] An Ning, Guan Bowen, Zhang Yilun, et al. Development review of satellite laser ranging data processing technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(8): 20200408. (in Chinese)
- [8] Long Mingliang, Deng Huarong, Zhang Haifeng, et al. Development of multiple pulse picosecond laser with 1 kHz repetition rate and its application in space debris laser ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(6): 0614001. (in Chinese)
- [9] Long Mingliang, Zhang Haifeng, Men Linlin, et al. Satellite laser ranging at 10 kHz repetition rate in all day [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, 39(6): 778-785. (in Chinese)
- [10] Deng Huarong, Zhang Haifeng, Long Mingliang, et al. 4 kHz repetition rate satellite laser ranging system and its application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0314002. (in Chinese)
- [11] Guo Tangyong, Li Xin, Tan Yechun, et al. New generation mobile SLR system TROS-I in China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(1): 31-34. (in Chinese)
- [12] Guo Tangyong, Wang Peiyuan, Li Xin, et al. Progress of the satellite laser ranging system TROS1000 [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2015, 6(1): 67-72.
- [13] Li Xin, Zhu Wei, Luo Qingshan, et al. KHz repetition rate mobile laser ranging system with high precision and measuring results analysis in western China [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(2): 0228001. (in Chinese)
- [14] Wang Lei, Zhao Chunmei, He Zhengbin, et al. Prediction method and accuracy analysis of laser ranging orbit for LEO satellites [J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2021, 9(4): 24-31. (in Chinese)
- [15] Geng Renfang, Wu Zhibo, Tang Kai, et al. Precise control of laser emission epoch in laser time transfer with high repetition rate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(10): 20200473. (in Chinese)
- [16] Fan Haibo, Wu Zhibo, Zhang Haifeng, et al. A method of realization of range gate generator with high realtime [J]. *Annals of Shanghai Observatory Academia Sinica*, 2010(31): 170-176. (in Chinese)
- [17] Wu Zhibo, Deng Huarong, Zhang Haifeng, et al. Interference and avoidance of atmospheric backscattering on satellite laser ranging with high repetition rate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0206002. (in Chinese)
- [18] Sun Shiya, Huang Fuxiang, Xia Xueqi. Forward simulation of solar backscattered ultraviolet radiation for satellite over the Tibetan plateau [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(3): 256-263. (in Chinese)
- [19] Chu Jinkui, Zhang Peiqi, Cheng Haoyuan, et al. De-scattering method of underwater image based on imaging of specific polarization state [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(5): 1207-1215. (in Chinese)
- [20] Chen Jie, Tong Yicheng, Xiao Da, et al. Retrieval methods for extinction-to-backscatter ratio of atmospheric aerosols [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1305-1316. (in Chinese)
- [21] Kirchner G, Koidl F. Kilohertz laser ranging at Graz: Our plans[C]//Proc of 13th International Laser Ranging Workshop Instrumentation, 2002.
- [22] Xiang Zhenjiao. Research on performance improvement of high-precision laser positioning system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [23] Mouser Electronics. GPX2-EVA-KIT Datasheet[EB/OL]. (2018-10-18)[2022-03-21]. https://www.mouser.com/datasheet/2/1081/TDC_GPX2_Evaluation_Kit_User_Guide-1949320.pdf