

文章编号:1001-9014(2008)06-0461-04

光子计数成像激光雷达时间间隔测量系统研究

朱磊, 黄庚华, 欧阳俊华, 舒嵘, 王建宇
(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:光子计数成像激光雷达需要测量一个激光主波和与之对应的多个回波之间的时间间隔,并具有高精度.采用延迟线插入法时间间隔测量技术,研制了具有27ps分辨率的多脉冲时间间隔测量系统,介绍了系统的软硬件结构及工作流程,测试了精度和线性度等指标,实验结果表明系统精度达到80ps,线性度良好.

关键词:光子计数;成像激光雷达;时间间隔测量;时间数字转换;延迟线插入法

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A

STUDY ON TIME INTERVAL MEASUREMENT SYSTEM IN PHOTON COUNTING IMAGING LIDAR

ZHU Lei, HUANG Geng-Hua, OUYANG Jun-Hua, SHU Rong, WANG Jian-Yu
(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The time intervals between laser main pulse and the corresponding multiple echoes were needed to measure in photon counting imaging lidar, and the system had to have high precision. The delay line interpolation method was used and a system with the resolution of 27ps was developed. The hardware and the software of the system were presented. The indexes such as the precision and linearity were tested. The results show that the precision can reach 80ps and the linearity is good.

Key words: photon counting; imaging lidar; time interval measurement; time-to-digital conversion; delay line interpolation method

引言

成像激光雷达是一种主动遥感技术,其通过测量发射与接收激光脉冲之间的时间间隔,可以获得精度极高的距离数据,绘制地表三维高程图,在城市、地球、行星等地貌状况测绘、资源调查、自然灾害预警等方面都可发挥重要作用.

传统激光雷达采用线性探测体制,不能有效利用激光回波中的光子能量,且系统功耗高,重量和体积庞大.光子计数成像激光雷达,采用高重频、低脉冲能量的激光发射机和能探测单个光子事件的光电倍增管或者盖革模式雪崩光电二极管,把对目标的探测由对波形的探测转换为对光子的计数,不仅可以充分利用回波光子能量,还能减小激光器内部光学损坏的风险和接收望远镜口径,提高长期可靠性,降低重量、体积和功耗.光子计数成像激光雷达具有

很高的灵敏度,对同一个激光主波信号,由于暗电流和背景光噪声等影响,会产生多个回波脉冲信号,因此需要记录测量范围内每个主波信号对应的所有回波信号,即系统必须测量一个 Start 脉冲与多个对应 Stop 脉冲之间的时间间隔,并具有高精度.

一般成像雷达的时间间隔测量系统仅具备对3~5个时间事件的测量能力,显然不能满足光子计数成像激光雷达的设计要求.文章基于专用的ASIC(TDC-GPX)芯片设计了用于光子计数成像激光雷达的时间间隔测量系统,其采用延迟线插入法^[1],通过内部锁相环技术将分辨率控制在27ps,具有40μs的测量范围.实验结果表明,该系统测量精度高、线性度好.

1 光子计数成像激光雷达结构

光子计数成像激光雷达主要由激光发射单元和

收稿日期:2008-01-03,修回日期:2008-05-17

基金项目:863计划(SQ2007AA12Z139475)资助项目

作者简介:朱磊(1980-),男,重庆人,博士生,物理电子学专业,主要从事成像激光雷达方面的研究工作.

Received date: 2008-01-03, revised date: 2008-05-17

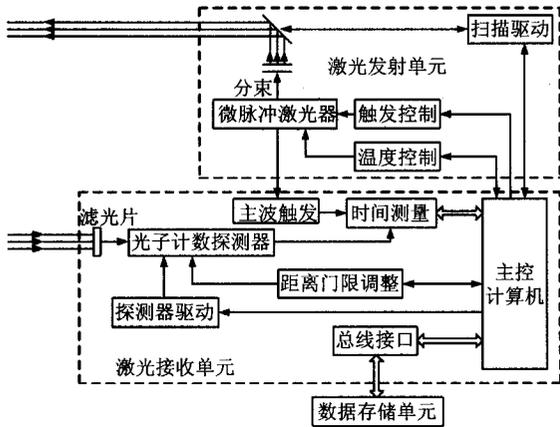


图1 光子计数成像激光雷达的主要结构
Fig.1 Main configuration of photon counting imaging lidar

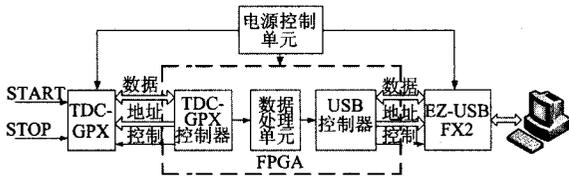


图2 时间间隔测量系统框图
Fig.2 Block diagram of the time interval measurement system

激光接收单元组成,其结构框图如图1所示.激光器发射高重频的窄激光脉冲,由摆镜二维扫描机构控制激光束进行扫描.激光照射到目标表面后,反射的激光回波光子信号由光子计数探测器接收,产生回波触发信号.激光发射时的主波触发信号与回波触发信号分别送入高速时间间隔测量电路进行计时,由此获得光脉冲飞行时间,经数据处理计算得到距离值 $z = c\Delta T/2$. 其中 c 表示真空中的光速, ΔT 表示激光往返时间. 距离值再由总线送入数据存储单元. 光子计数成像激光雷达把从激光发射到激光回波返回这段时间区间内所有光子事件,包括随机背景噪声和信号都看作潜在的有效数据记录下来,通过一定处理算法将有效距离数据从记录数据中提取出来. 为提高系统探测概率,降低虚警概率,使用距离门限调整单元将距离波门控制在目标对应的距离附近,探测器仅响应距离波门内的光子事件.

2 时间间隔测量系统的工作原理

时间间隔测量系统主要由电源控制单元、GPX 芯片, TDC-GPX 控制器、数据处理单元, USB 控制器和 EZ-USB FX2 芯片组成,其框图如图2所示.

系统上电复位后, TDC-GPX 控制器对系统进行初始化,当接收到第一个 Start 脉冲信号后,系统处

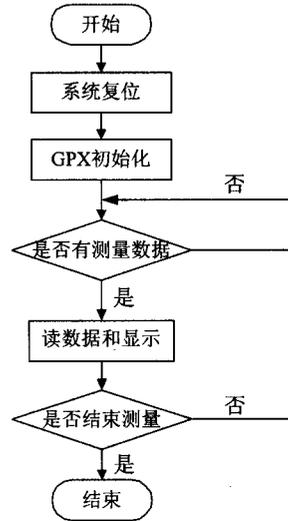


图3 时间间隔测量系统的程序流程
Fig.3 Program flow chart of the time interval measurement system

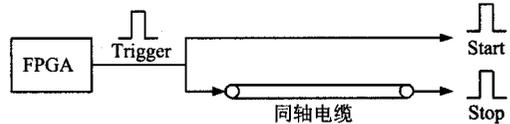


图4 延时产生电路框图
Fig.4 Block diagram of the delay generating circuit

于工作模式. TDC-GPX 控制器不断检测 GPX 芯片内部接口 FIFO, 如果 FIFO 不为空则将数据读出, 经数据处理单元缓存、格式转换后, 通过 USB2.0 总线传输至计算机作最后的显示和分析. USB 控制器中设置 Start 脉冲计数器, 用于记录测量过程中发射激光脉冲的数量. 为提高系统集成度, TDC-GPX 控制器、数据处理单元和 USB 控制器的功能集成到一块 FPGA 中. 图3是时间测量系统的工作流程图.

3 测试结果

由公式 $z = c\Delta T/2$ 可知, 激光雷达的测距性能主要取决于时间间隔测量系统的性能. 时间间隔测量系统的性能主要由精度、线性度以及稳定度等指标来衡量, 由于稳定度取决于系统的核心电压、环境温度等参数, 不便于测量, 故只设计了测试系统精度和线性度的方案.

3.1 系统精度测试

精度测试方案需要一个稳定且可调节的时间间隔作为测试源, 为此, 专门设计了延时产生电路, 该电路能产生两个时间间隔稳定并可精密调节的窄脉冲, 其框图如图4所示.

表 1 对 6 个标准时基输入信号的测试结果

Table 1 Testing results of 6 standard time interval inputs

| 标准时间间隔 T (ns) | 最小值 T_{min} (ns) | 最大值 T_{max} (ns) | 平均值 T_{avg} (ns) | 标准差 σ (ps) |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| 0.966 | 1.043 | 1.317 | 1.181 | 45.766 |
| 4.83 | 4.883 | 5.268 | 5.056 | 64.384 |
| 14.49 | 14.431 | 14.760 | 14.589 | 39.297 |
| 24.15 | 24.060 | 24.362 | 24.199 | 42.295 |
| 38.64 | 38.299 | 38.765 | 38.492 | 68.956 |
| 48.3 | 47.956 | 48.395 | 48.184 | 71.568 |

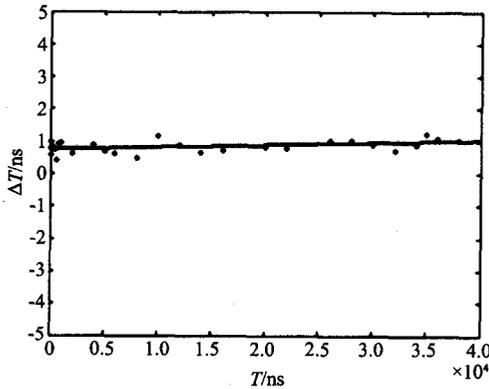


图 5 量程内的测量误差拟合曲线

Fig. 5 Curve fitting of measurement error within range

由 FPGA 产生一个脉冲信号作为触发信号,触发信号直接进入时间间隔测量系统的 Start 通道,用不同长度的同轴电缆对触发信号延时来产生 Stop 信号,从而获得两个时间间隔可调的脉冲信号,模拟脉冲激光测距中的 Start 和 Stop 信号.分别用 0.2m, 1m,3m,5m,8m 和 10m 的 RF316 同轴电缆产生延时,每米同轴电缆的延时为 4.83ns,故延时分别为 0.966ns, 4.83ns, 14.49ns, 24.15ns, 38.64ns 和 48.3ns.分别对每组延时作 10000 次测量,测试结果如表 1 所列.

分析表 1 数据可知,时间间隔测量的标准差 <80ps,对应的测距误差 <12mm.

3.2 系统线性度测试

在 0~40us 的测量范围内,抽取 28 个标准时间间隔作为输入值.由于量程范围较大,如果采用上述延时电路产生标准时间间隔,同轴电缆会很长,Stop 信号衰减很厉害,因此改用 FPGA 通过内部延时产生 Start 和 Stop 信号.分别对每个输入值进行 10000 次测量,计算其平均值与对应标准时间间隔 T 的差值 ΔT ,即 $\Delta T = T - T_{avg}$.测试结果如图 5 所示,图中横坐标代表标准时间间隔 T ,纵坐标代表测量平均值与其对应标准时间间隔 T 的差值 ΔT .

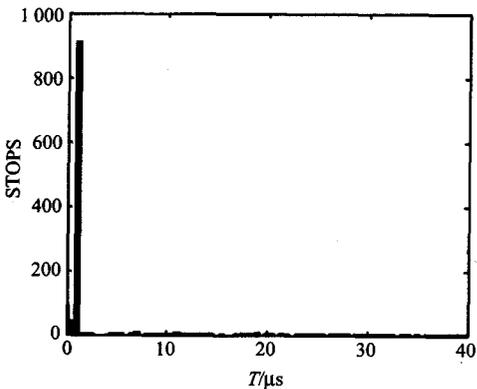
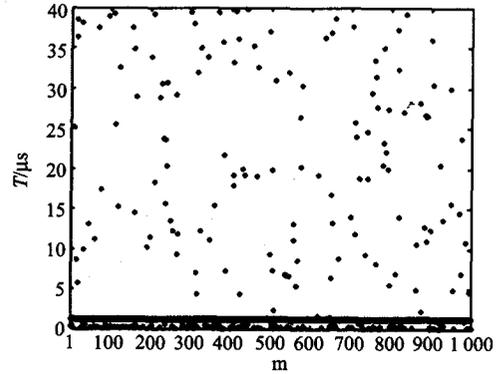


图 6 采集数据的点云分布和统计图

Fig. 6 Point cloud distribution and statistics diagram of collected data

由图 5 可以看出,系统在整个测量范围内都保持很好的线性度,拟合曲线方程为 $y = 7.084 \times 10^{-6}x + 0.7296$,其中直线斜率为 7.084×10^{-6} ,即在整个测量范围内,对于 10000 次测量结果的平均值,测量相对误差达到 10^{-5} 量级.在实际测量中,可依据此方程来对测量值进行修正.

3.3 激光雷达系统整体测试

用激光雷达系统于夜间测试距离为 180m 左右的建筑物,采集时间数据的点云分布和统计图如图 6 所示.

图中,上面部分横坐标为 Start 脉冲的序号,纵坐标为 Stop 脉冲与对应 Start 脉冲之间的时间间隔;下面部分横坐标为时间间隔,纵坐标为在某一时间范围内 Stop 脉冲的数量.

分析图 6 发现,时间数据主要集中在 $1.234\mu s$ 附近,取距离波门为 $[1.233, 1.235]\mu s$,认为其中的数据为目标反射的激光回波,其他散离的数据主要是由大气后向散射的激光光子、背景光和暗电流等噪声引起的脉冲信号.计算得平均时间间隔为 $1.2339\mu s$,标准差为 $0.3229ns$,根据测距公式,平均距离值为 $185.0851m$,测距精度为 $0.1453m$.

4 结语

文章研制的时间间隔测量系统已成功应用于光子计数成像激光雷达样机中,获得了较好的性能评价,达到了设计要求.该系统对光子计数这种新型探测体制的后续研究,提供了有益的支持,具有重要的实际意义.

REFERENCES

- [1] HUO Yu-Jing, CHEN Qian-Song, PAN Zhi-Wen. Review on time-of-flight measurement of pulsed laser radar[J]. *Laser & Infrared*(霍玉晶,陈千颂,潘志文.脉冲激光雷达的时间间隔测量综述. *激光与红外*), 2001, 31(3): 136—139.
- [2] WU Gang, LI Chun-Lai, LIU Yin-Nian, et al. Study on high resolution time interval measurement module in pulsed laser ranging system[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(吴刚,李春来,刘银年,等.脉冲激光测距系统中高精度时间间隔测量模块的研究. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(3): 213—217.
- [3] GUAN Fu-Hong, WANG Chuang, TIAN Wei-Zhong, et al. Development of MMIC direct detection receivers[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(关福宏,王闯,田为中,等.直接检波式毫米波接收机研制. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(2): 125—128.
- [4] CHEN Yu-Wei, ZHANG Li, HU Yi-Hua, et al. Array detection technology of echo on earth observation laser imager[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(陈育伟,张立,胡以华,等.对地观测激光成像的回波阵列探测技术. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(3): 169—171.
- [5] HU Yi-Hua, FANG Kang-Mei, SHU Rong, et al. Sounding effect of laser scanning imaging in earth observation[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(胡以华,方抗美,舒嵘,等.对地观测激光扫描成像探测效果研究. *红外与毫米波学报*), 2001, 20(5): 335—339.
- [6] YANG Cheng-Wei, CHEN Qian-Song, LIN Yan, et al. Measurement on time-interval in pulsed laser ranging and error analysis[J]. *Infrared and Laser Engineering*(杨成伟,陈千颂,林彦,等.脉冲激光测距时间间隔测量及误差分析. *红外与激光工程*), 2003, 32(2): 123—126.

2009 年《红外与毫米波学报》征订启事

《红外与毫米波学报》着重反映红外与毫米波领域的新概念、新成果、新进展,是中国与国际红外与毫米波学术界交流最新研究成果的平台.其宗旨是努力做到发扬科学民主、提倡学术讨论、活跃学术思想、促进国内外同行间的学术交流、促进红外与毫米波科学技术的不断发展.

《红外与毫米波学报》主要报道红外与毫米波领域的最新研究成果和技术进展,刊登在红外物理、凝聚态光学性质、低能激发过程、飞秒光谱学、非线性光学、红外光电子学、红外与毫米波领域的元器件、系统及应用、智能信息和人工神经网络等方面有创新的研究论文、研究简报.读者对象为国内外红外与毫米波领域的科研人员、工程技术人员及高等院校师生、研究生等.

《红外与毫米波学报》为《SCI》、《EI》、《CA》、《SA/INSPEC》、《AJ》、《SCOPUS》等国际著名检索体系收录.为“中国自然科学核心期刊”、“中国科技核心期刊”.

本刊由中国科学院上海技术物理研究所和中国光学学会共同主办,中国科学出版社出版,为中、英文混排双月刊,大 16 开本、80 页,定价:10 元/期.国内外公开发行,全国各地邮局均有订阅,邮发代号:4-335.

如中国光学学会会员向本刊编辑部订阅,可享受九折优惠.

本刊地址:上海市玉田路 500 号《红外与毫米波学报》编辑部 邮政编码:200083

电话:021-65420850 * 73206 传真:021-55393960 电子邮箱:jimw@mail.sitp.ac.cn