

引用格式: ZHONG Yumin, KONG Wei, QIU Yanqing, et al. Design of a Multi-channel Time-resolved Single-photon Detection System for Laser Induced Spectrum Detection[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12):1204001

钟宇民,孔伟,裘燕青,等. 应用于激光光谱探测的多通道时间分辨单光子探测系统设计[J]. 光子学报, 2021, 50(12):1204001

应用于激光光谱探测的多通道时间分辨单光子探测系统设计

钟宇民^{1,2,3}, 孔伟^{2,3}, 裘燕青¹, 陈滔^{2,3}, 黄庚华^{2,3}

(1 中国计量大学 光学与电子科技学院, 杭州 310018)

(2 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083)

(3 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:介绍了一种多通道时间分辨单光子探测系统,并将其应用于高灵敏度激光光谱探测。系统基于工作在高增益状态下的 32 通道线阵光电倍增管,对其输出单光子脉冲信号进行放大、阈值比较后,转换为 LVDS 数字电平,再利用 FPGA 芯片内部的串并转换硬核资源,使用 800 MHz 时钟的双边沿对信号进行采样,串转并后,在相对低速的 200 MHz 时钟频率下对信号进行逻辑解析。在单片 XC7K160T 型 FPGA 芯片上实现了 625 ps 时间分辨率、死时间 5 ns 的 32 通道光子探测。利用该探测器,搭建了基于光栅分光的 532 nm 脉冲激光激发光谱探测系统,实现了 620 nm~720 nm 光谱范围和 3 nm 光谱分辨率的距离分辨激光光谱探测。

关键词:光子计数;光电倍增管;激光光谱探测;时间数字转换;现场可编程门阵列芯片

中图分类号:O433.2

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215012.1204001

Design of a Multi-channel Time-resolved Single-photon Detection System for Laser Induced Spectrum Detection

ZHONG Yumin^{1,2,3}, KONG Wei^{2,3}, QIU Yanqing¹, CHEN Tao^{2,3}, HUANG Genghua^{2,3}

(1 College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

(2 Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

(3 Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A multi-channel and time-resolved single-photon detection system was described, which is applied to high-sensitivity laser induced spectroscopy measurement. The photon detection system is based on a 32-channel linear array photomultiplier tube working at high-gain state. After amplifying and threshold discriminating, the single-photon pulse signal is converted to digital signal with LVDS level. Using the serial-to-parallel conversion hardcore resources of FPGA chip, the signal is sampled by a high-speed 800 MHz clock bilateral edge sampling. After the serial parallel conversion, the signal is logically parsed at a relatively low speed of 200 MHz clock frequency. The system realizes a 32-channel photon detection with 625 ps time resolution and 5 ns dead time on a single XC7K160T FPGA chip. Using this detection system, a 532 nm pulsed laser induced spectrum observation system based on grating spectroscopy was built. It

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61505236, 61805268, 61875219),上海市市级科技重大专项(No.2019SHZDZX01),中国科学院空间主动光电技术重点实验室基金(No.CXJJ-19S019)

第一作者:钟宇民(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为光电仪器。Email: ym.zhong@foxmail.com

通讯作者:孔伟(1988—),男,助理研究员,博士,主要研究方向为激光遥感探测技术。Email: kongwei@mail.sitp.ac.cn

收稿日期:2021-06-29; **录用日期:**2021-07-28

<http://www.photon.ac.cn>

realizes range-resolved laser spectral detection with 620 nm~720 nm spectral range and 3 nm spectral resolution.

Key words: Photon counting; Photomultiplier tube; Laser spectrum detection; Time digital converter; Field programmable gate array

OCIS Codes: 040.5160; 300.6500; 010.1080; 000.3110; 120.1880

0 引言

时间分辨光谱探测系统依靠发射单频或者宽谱段的脉冲激光,再利用色散光学元件将目标散射返回不同波段的信号分离,通过测量该返回的光谱信号随时间的变化,实现距离分辨的光谱探测^[1-5],这种系统被广泛应用于大气海洋等透明介质或者三维目标的光谱探测。

基于单光子探测器的激光光谱探测技术,通常采用增益超过 10^5 的阵列探测器,一般为光电倍增管或盖革模式雪崩光电二极管,将响应到的回波光子的光子转换为电脉冲信号,再利用时间数字转换技术(Time Digital Converter, TDC)测量每个回波光子的光子事件(Stop信号)与发射激光脉冲(Start信号)的时间差,多个激光脉冲的回波光子的光子事件进行分距离门统计,实现距离分辨光谱测量^[6-8]。由于探测灵敏度达到单光子级,这种技术可以大幅度提高对弱散射信号的探测能力。例如,日本国立环境研究所利用工作在高增益单光子灵敏度的32通道线阵光电倍增管,采用百毫焦级紫外脉冲激光激发、直径1 m望远镜接收回波信号,实现近地面到2 km范围大气气溶胶的弱拉曼和荧光光谱探测^[9];武汉大学研究团队同样利用该技术,开展地基激光雷达获取云层中水汽、液态水弱拉曼光谱信号探测,应用于云物理过程相态变化研究^[10]。

大气探测应用对距离分辨率的要求较低,一般实现若干米的距离分辨、几十纳秒级的时间分辨探测,即可满足大部分应用需求,但是对于三维目标光谱等高距离分辨率应用,则需要达到百皮秒级时间分辨率,才能满足厘米级的距离分辨要求。本文介绍了一个自研的时间分辨率达到625 ps的32通道时间分辨单光子探测系统,应用于532 nm脉冲激光激发光谱探测,实现距离和光谱信息的同时获取,并基于该探测器搭建的系统开展激光光谱探测实验。

1 多通道时间分辨单光子探测系统设计

本文32通道时间分辨单光子探测系统主要应用于可见光波段的时间分辨光谱探测,基于日本滨松公司生产的32通道线阵光电倍增管,系统记录探测器32个光谱通道的所有光子事件,并传送给计算机。图1为自研模块图片,它由探测器、高压电路、放大及阈值比较电路、数字电路、结构框架组成。图2为系统电路原

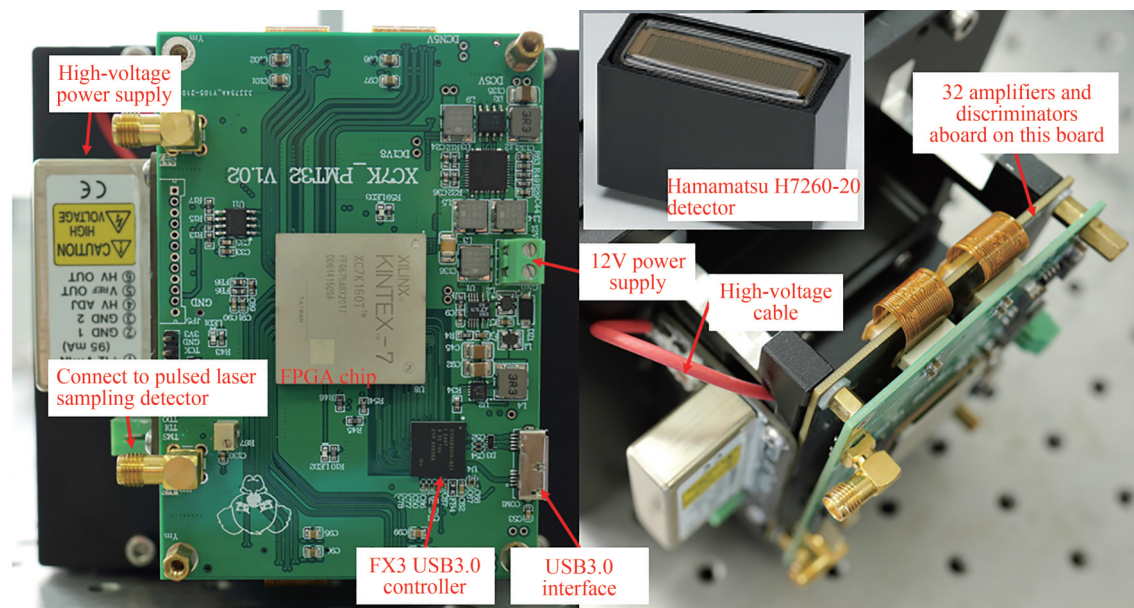


图1 32通道时间分辨单光子探测模块

Fig.1 32-channel time-resolved single-photon detection system

理框图,阵列探测器将单光子事件转成电脉冲,再由放大及阈值比较电路转换为LVDS数字电平信号,数字电路测量参考激光发出的起始信号与回波光子的时间差,实现时间分辨的光子探测,并将每一个探测到的光子事件对时间、通道序号、对应激光脉冲等信息进行编码后,通过USB3.0外设控制器FX3传输给计算机。

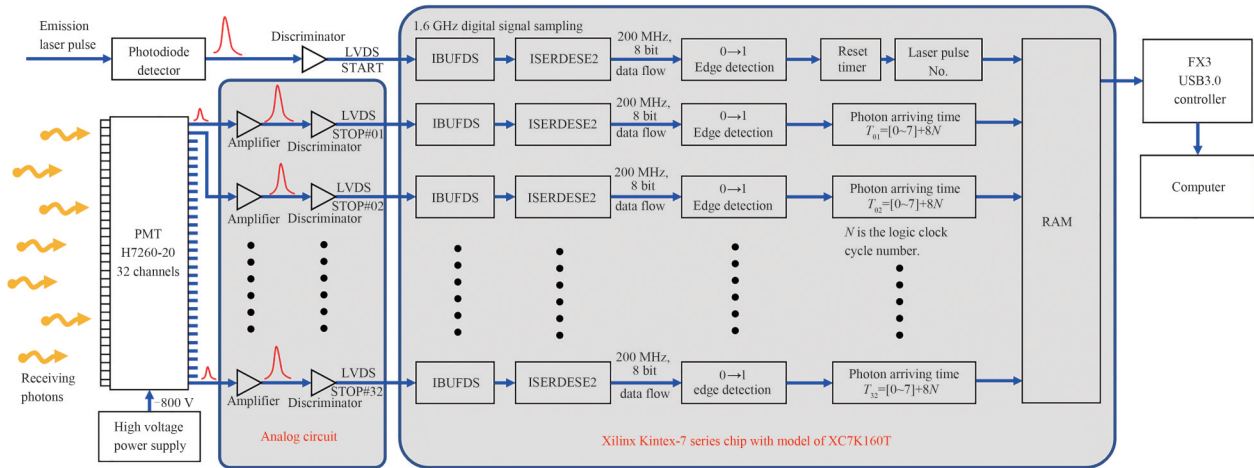


图2 32通道单光子数据采集系统工作原理

Fig.2 Working principle of the 32-channel single-photon data acquisition system

1.1 探测器

系统采用滨松公司H7260-20型光电倍增管,其响应波段为300~900 nm,在650 nm附近量子效率大约15%,利用滨松公司C4900-01高压电源模块为该光电倍增管提供-800 V高压,对应增益约为 10^6 ,单个光电子经光电倍增管多级倍增后可以产生峰值电流约为200 μ A、半高全宽1~2 ns的电脉冲信号,再经过带宽450 MHz、8倍增益的反相放大电路,转换为如图3中通道3所示的峰值电压大约300 mV的脉冲信号。该信号再经阈值比较电路二值化为如图3中通道1和2所示的LVDS标准电平后传送给FPGA。

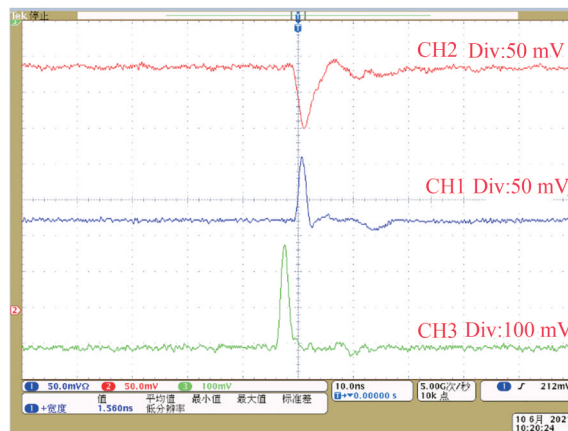


图3 单光子电脉冲信号

Fig.3 The single photon electrical pulse signal

对于系统采用的H7260-20探测器,其输出单光子信号的脉冲宽度大约1~2 ns,当两个光子事件时间间隔仅若干纳秒时,探测器也能将两个光子事件加以区分地输出,可以实现饱和计数率几百MHz的光子信号输出。对于数据采集系统而言,则需要具备识别相隔仅若干纳秒光子信号的能力。本系统经阈值比较电路后,输出的LVDS数字信号的脉冲宽度约为1.5 ns,可以减小距离较近的相邻光子之间的影响,有助于提高数据采集电路的较近光子分辨能力。

1.2 多通道时间延迟测量电路

经多通道放大电路、阈值比较后,输出的LVDS数字电平脉冲信号(Stop信号)反映了光子的到达时刻,利用在FPGA上设计的TDC数字电路,精准测量其与发射激光脉冲信号(Start信号)的时间差,以实现距离分辨的单光子探测。

TDC可以采用时钟周期、延迟链或者多相位时钟等方法实现^[11-12]。其中时钟周期法通过测量Start和Stop信号之间的采样时钟脉冲数,来获取时间差,可实现若干纳秒分辨率的时间测量,一般应用于距离分辨率要求较低的应用场景(例如大气探测领域),这种方法芯片资源消耗较少,适合于时间分辨率要求不高且通道数较多的应用。

本系统所采用的方法与时钟周期计数法类似,但是引入串行数据转并行数据的方法,利用Xilinx Kintex-7系列XC7K160T型FPGA芯片的SelectIO硬核资源,利用800 MHz时钟的双边沿对信号进行采样,串转并后,得到的8位数据在相对低速200 MHz逻辑时钟频率下进行信号解析,实现一个逻辑时钟周期内时间测量的细分,进一步提高传统时钟周期计数法的时间测量分辨率。

图4是SelectIO硬核的原理及时序,IBUFDS为SelectIO中的差分输入时钟缓冲器,它将LVDS电平标准的差分信号单端化至芯片内部;ISERDESE2为串并转换器,它将IBUFDS输入的串行数据转换为FPGA芯片可以处理的并行数据,实现1.6 GHz的数字信号采样。

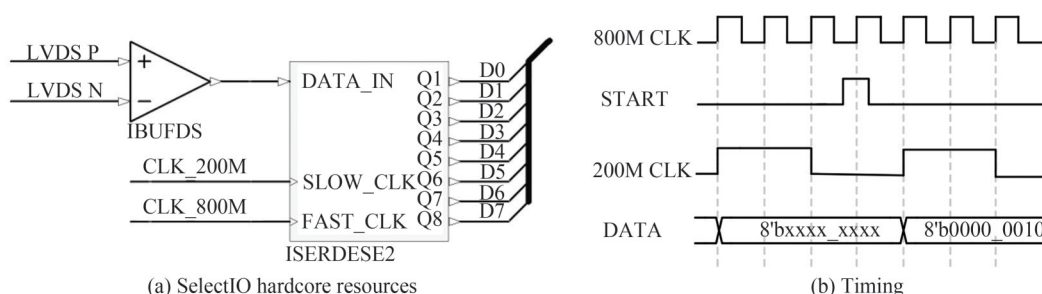


图4 高速数字信号读取原理

Fig.4 High-speed digital signal reading principle

根据图2所示的FPGA芯片内部数据处理流程,转换为LVDS数字电平信号的1路激光采样信号和32路单光子回波信号,经1.6 GSps并行高速数字采样后,被转换成33路200 MHz、8 bit的数据流,当识别到激光采样信号的0→1变化后,将计时器重置。此后,当回波通道检测到0→1变化时,记录发生0→1变化的8 bit并行数据位置及时钟周期数,即可得到回波光子和发射激光脉冲的时间差。系统采用FPGA内部RAM缓存所有的激光脉冲事件及回波光子事件,这些数据由FX3 USB3.0控制器传输至计算机。传输至计算机的每一个单光子事件均采用32 bit存储,其中8 bit用于标志通道和用户需求的特殊信息,24 bit用于存储回波光子与发射激光脉冲的时间差,按照采集系统625 ps的时间分辨率,24 bit时间存储深度对应的最大量程为10.5 ms($2^{24} \times 625$ ps),当然,只有当激光重频较低时(例如仅几十Hz),10.5 ms的最大量程才具有实际意义。

与标准的时钟周期计数法相比,本系统采用的时间测量方法实现了一个时钟周期内时间测量的8倍细分,而且它对FPGA芯片的资源消耗相对较低,在利用XC7K160T型FPGA芯片实现32路625 ps时间分辨率(9.4 cm距离分辨率)光子数据采集、编码、存储与传输时,消耗芯片12 773个(50.39%)Slices逻辑单元、16组(4.92%)Block RAM存储器、33个(8.59%)IBUFDS差分信号输入缓冲器、33个(8.59%)ISERDESE2串并转换器,芯片总功耗718 mW,而且直接调用芯片硬核的设计方法,使得通道一致性及可扩展性较好,此设计可应用于更多通道探测。

2 测试与分析

2.1 探测系统死时间评估

死时间定义为单光子探测系统识别到一个光子事件后,能响应第二个光子事件的时间差^[13]。理论上

说,本系统最小可分辨两个相隔大约2个距离门宽度的光子事件(即事件间隔 $2 \times 625 \text{ ps} = 1.25 \text{ ns}$),但是考虑到探测器输出单光子信号的脉冲宽度(1.5 ns半高全宽)、鉴别电平阈值(20 mV)与单光子信号的峰值(300 mV)之间的比例、芯片向内部缓存空间传输单光子事件的速度限制等因素,实际系统对相邻光子的分辨能力无法达到理想值,即实际情况下,系统很难分辨相隔仅1.25 ns的两个光子事件,本文利用单光子事件的统计分布特征对系统分辨相邻光子的能力进行评估。

光子是光的最小组成单元,对于平均计数率 C_0 的信号, τ 时间内,平均光子数为 $C_0\tau$,在这个时间范围内,检测到 k 个光子的概率为

$$P(X=k) = \frac{(C_0\tau)^k}{k!} \times e^{-C_0\tau} \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

即有光子和没光子的概率分别为

$$P(X \geq 1) = 1 - e^{-C_0\tau} \quad (2)$$

$$P(X=0) = e^{-C_0\tau} \quad (3)$$

因此,当系统接收到一个光子事件后,第二个光子事件出现在 $[t, t + \Delta t]$ 时间区间的概率可以写为

$$\Delta P(t, t + \Delta t) = e^{-C_0t}(1 - e^{-C_0\Delta t}) \quad (4)$$

其中式(4)右侧的第一项为0到 t 时间内没有光子事件的概率,第二项为 $[t, t + \Delta t]$ 区间内出现至少一个光子事件的概率。利用式(4),可以得到对于平均光子计数率 C_0 的信号,在对数坐标下,两个相邻光子事件的时间间隔的概率密度函数为

$$f(t) = \frac{\Delta P}{\Delta \log_{10} t} = \frac{\Delta P}{\Delta t} \frac{\Delta t}{\Delta \log_{10} t} = \ln 10 C_0 t e^{-C_0t} \quad (5)$$

为对泊松分布描述下的相邻光子事件时间间隔进行验证,搭建了图5所示的系统,将探测系统安装在连续光源照射的积分球出口端,在出口端安装中性滤光片调节照射到探测器光敏面的光强,记录采集到的所有原始单光子事件,计算相邻光子事件的时间差,并对时间差的分布进行统计。

图6是实际测量数据与理论曲线的差异,蓝色为不同时间间隔区间统计得到的光子数,统计时将时间取

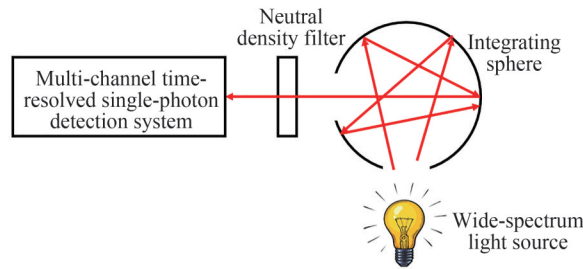


图5 测试系统最小可分辨光子间隔的实验装置原理图

Fig.5 Schematic diagram of the experimental setup for evaluating the nearest resolvable adjacent photons

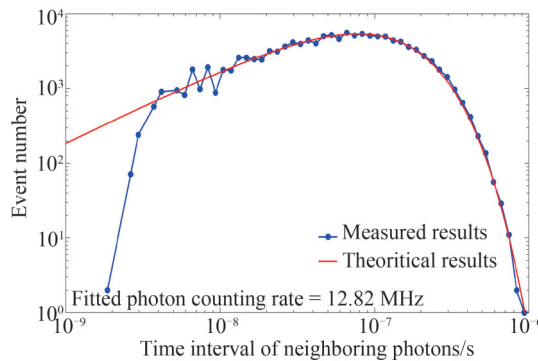


图6 相邻光子事件时间间隔统计结果对比

Fig.6 Statistical comparison of time interval between neighboring photons

10为底的对数,每0.05间隔作为一个统计区间,计算区间内的光子数,再与式(5)描述的函数乘以一个常数进行拟合,考虑到采集系统对10 ns以下时间间隔的两个光子事件同时识别的概率要低一些,仅对时间间隔10 ns以上的光子对进行拟合,拟合得到平均光子计数率 C_0 为12.82 MHz,从图6的对比中可以看出,实验测量结果与理论曲线,在5 ns以上吻合较好且趋势一致,5 ns以下则存在显著的偏差,表明探测系统对死时间大约为5 ns。

对于本系统所采用的光电倍增管这种单光子探测器件,它基于外光电效应和二次电子发射效应,由若干个倍增级将逸出光阴极材料表面的光电子转换为可以观测的脉冲信号。相比基于内光电效应的单光子探测器件(例如盖革模式雪崩光电二极管),光电倍增管在响应到单个光子事件后不会产生击穿现象,可以持续对单光子事件进行响应,即探测器对相隔很近的第二个光子事件的响应能力不会减弱,因此,单光子探测系统的死时间效应主要来源于光电倍增管后端模拟电路的非理想响应特征。

2.2 激光光谱探测测试

图7是基于自研的32通道时间分辨单光子探测系统搭建的激光光谱探测实验装置,由脉冲激光器、接收光学镜片组、光栅分光系统、32通道时间分辨单光子探测系统和计算机等组成。激光器向目标发射脉冲激光,激光照射到目标后,由接收透镜组采集目标散射信号,再经基于透射光栅的光谱仪将不同波段信号色散至探测器的不同通道,探测器的32个像元对应620~720 nm波段,相邻通道的光谱差异大约为3 nm。该接收系统拟应用于开展海洋中水的拉曼与叶绿素荧光信号探测,对于532 nm激发,水的拉曼散射中心波长为650 nm,海洋中叶绿素荧光的中心波长为685 nm,620~720 nm的探测范围可以完整覆盖拉曼与荧光信号的中心及边缘区域,满足开展深度分辨海洋叶绿素探测需求。

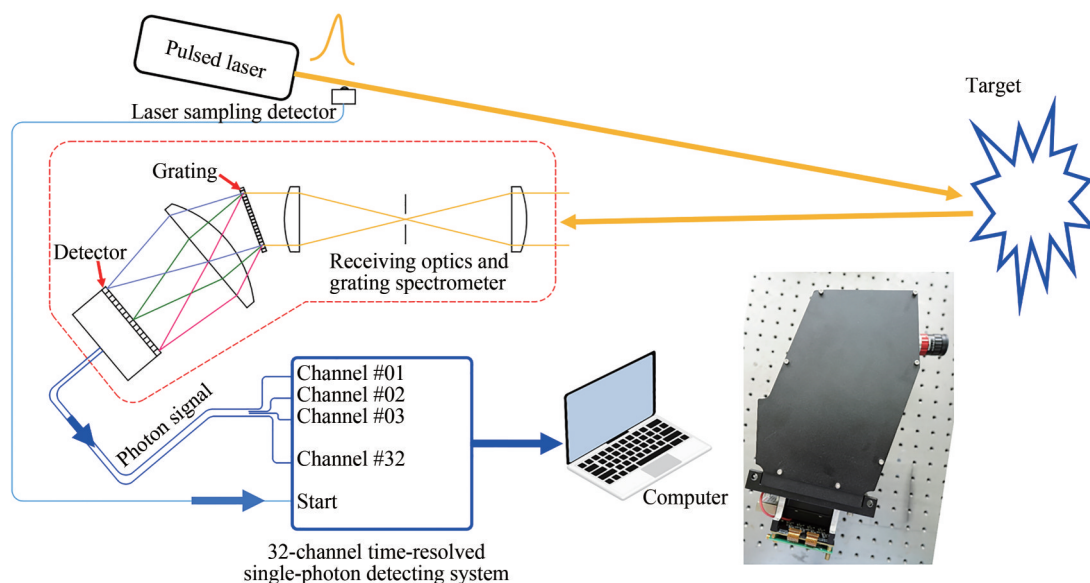


图7 基于32通道时间分辨单光子探测系统的激光激发光谱探测实验装置

Fig.7 Laser induced spectrum detection experimental setup based on 32-channel time-resolved single-photon detection system

为了测试系统的光谱分辨率,将一台单色仪的输出光导入至接收系统,单色仪可以输出连续可调的单色光,输出信号光谱宽度0.47 nm,波长每变化1 nm采集一次数据,图8是第15和16通道的测量结果,其中散点数据为实际采集的信号,实线为高斯拟合曲线。拟合得到的偏置项主要来源于探测器的暗计数及外部环境光,从拟合结果可以看出,通道光谱响应函数的半高全宽大约为3.1 nm,考虑到532 nm激发的拉曼与叶绿素荧光峰的光谱间隔为35 nm,谱线半高全宽大约20 nm,可以认为光谱响应函数宽度对测量的影响不大。

为了测试探测系统距离分辨率是否满足设计要求,图7中探测系统的激光器采用一台超连续谱脉冲激光器,其输出脉冲宽度小于400 ps激光,小于接收系统时间分辨率的设计值,光谱范围覆盖450 nm~

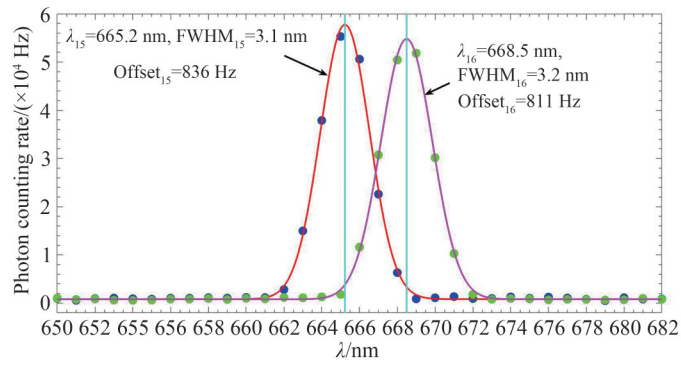


图8 单色仪测试得到的第15和16通道光谱响应曲线

Fig.8 Spectral response curves of channel 15 and 16 measured by monochromator

2 400 nm,涵盖了探测系统的光谱范围,被探测目标设置为金属靶标,通过移动金属靶标,测量不同距离的回波信号,来对时间/距离分辨率进行测试。图9为靶标移动过程中,第16个通道的信号变化,每0.025 m开展一次测量,可以看出,随着距离的变化,能量在临近几个距离门的分布开始变化,当距离差异增加到0.1 m时,回波能量分布的最大值位置变化一个距离门。图10是开展不同距离测试时,回波信号极大值位置随着靶标距离变化的结果,可以看出,靶标距离每增加0.075 m或者0.1 m,信号的极大值位置移动一个距离门(0.094 m),说明探测系统的时间分辨率是满足设计值的。对于实际的探测系统,时间分辨率还与发射激光的脉冲宽度有关,当发射激光脉冲宽度远大于电路的时间分辨率时,系统的时间分辨率主要取决于激光的脉冲宽度。

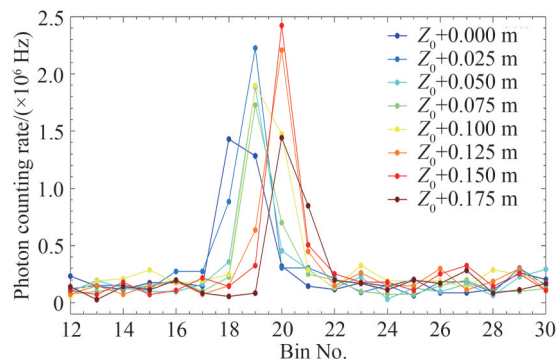


图9 移动靶标开展距离分辨率测试时,不同距离下通道16的回波信号变化

Fig.9 Variations of echo signal at channel 16 while changing distance of the target

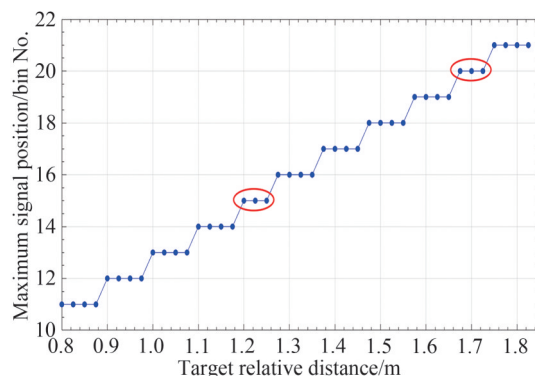


图10 回波信号最大值位置与靶标移动距离的关系

Fig.10 Relationship between Maximum signal position and the target relative distance

将图7中系统的激光器换为一台脉冲激光器,该激光器以15 kHz重频向目标发射一束脉冲宽度小于1 ns的532 nm激光,激光单脉冲能量最高可达300 μ J,基于该系统,对纯水、自然水域水进行实验,用来验证该系统的激光激发光谱探测能力。光谱测试过程中,将纯水或者自然水域水存放在透明方形玻璃容器内,玻璃容器沿光束传播方向厚度为0.14 m,摆放在距离探测系统大约3 m处,测量532 nm脉冲激光激发的非弹性散射光谱信号。

图11为第11个通道(拉曼信号中心波长)的原始单光子数据及不同距离门统计的直方图,图11(a)中的原始数据展示了大约20 s的该系统所有单光子事件,0到15 m距离内一共2 038个单光子事件,可以清晰地看到目标位置处的高密度点云分布,图11(b)为625 ps时间分辨率累积的光子数,峰值光子数出现在第39个距离门(24 ns处),信号的半高全宽大约1.5 ns,主要受激光脉冲宽度、被测水的厚度等因素的影响。图12是纯水和自然水域水的光谱测试结果,图12(a)和12(b)分别为针对纯水和自然水域水的距离分辨光谱强度数据,数据展示了不同光谱通道在37到41个距离门的平均光子计数率变化,对于纯水,目标附近能量主要集中在650 nm附近^[14],对于自然水域水,由于水中浮游植物的存在,可以清晰看到685 nm叶绿素荧光信号^[15],图12(c)和12(d)清晰地展示了二者光谱的差异。图12中数据均以光子计数率来展示,它表示单位时间的回波光子数,由累积的光子数除以时间门宽度和累积脉冲数得到。

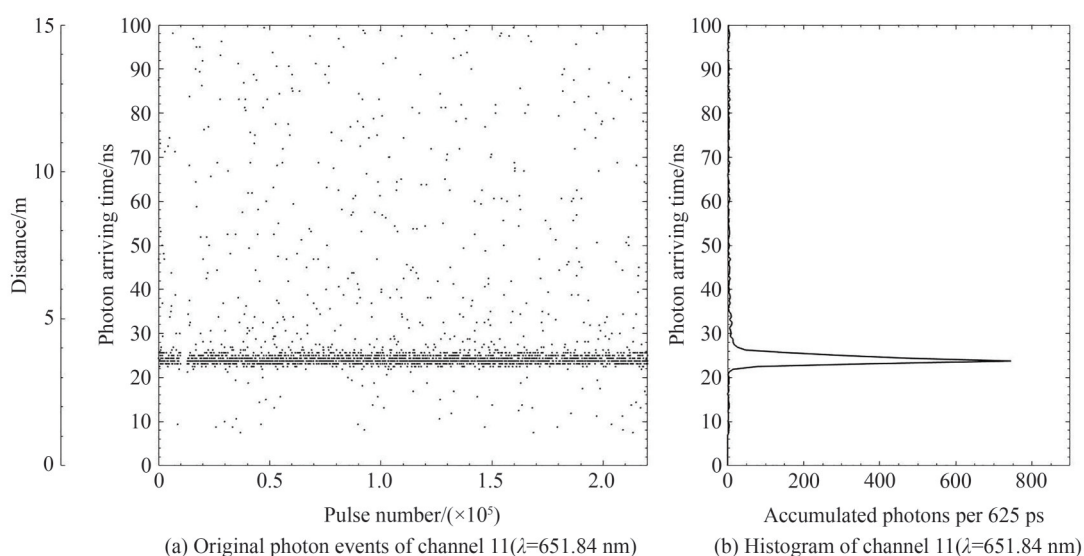
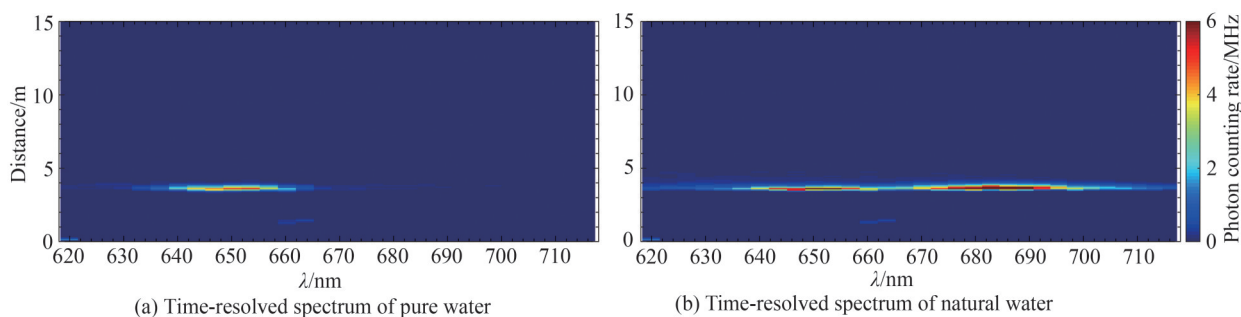


图11 通道11采集的原始光子数据及其直方图
Fig.11 Original photon data and histogram of channel 11

由于光栅、镜片和探测器在不同波段效率的差异,测量得到的光谱与实际光谱信号还存在一定的差异,这可以在外场实验的过程中,与标定过的基于普通探测器的光谱仪进行同指向和同时观测,来对光谱曲线进行校正。



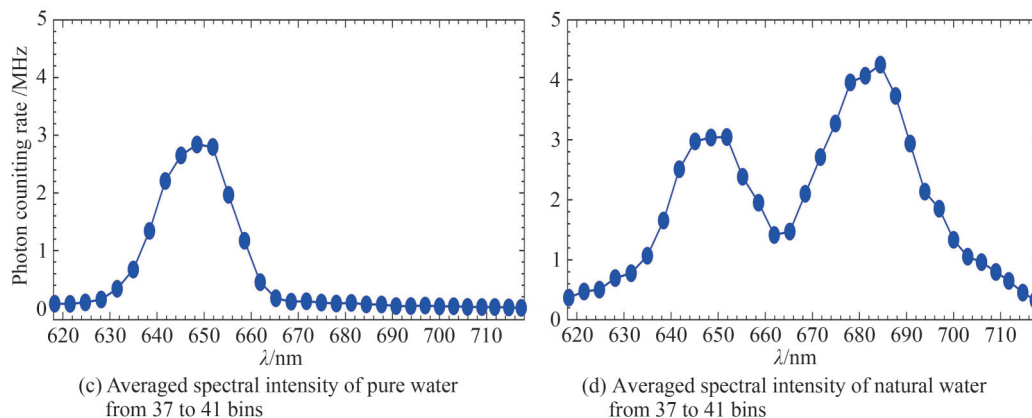


图12 目标分别为纯水和自然水域水时,激光激发光谱差异

Fig.12 Difference of the laser induced spectrum while the observation targets are pure and natural water respectively

3 结论

基于滨松公司H7260-20型32通道线阵光电倍增管,研制了一台多通道时间分辨单光子探测系统,实现了625 ps时间分辨率和5 ns死时间的光子探测,并应用于高灵敏度激光光谱探测。

为了利用单个中小规模的FPGA芯片实现32通道的光子事件采集,系统采用了改进型的时钟周期计数法,基于芯片的串并转换硬核资源,利用800 MHz时钟的双边沿对信号进行采样,实现1.6 GHz、32通道的数字信号采样,再通过FPGA内部解析,实现了625 ps时间分辨率光子事件探测。这种方法相比传统时钟周期计数法,时间分辨率更高,相比延迟链法,时间分辨率差,但是资源消耗少,适合于几百皮秒级时间分辨率、几十个通道同时进行光子探测的应用。

本文还对相邻光子事件的时间差进行了统计,发现在5 ns以上,其与理论曲线一致性非常高,在5 ns以下,由于探测器输出光子脉冲展宽等因素,相隔较近的第二个光子存在较大的漏识别概率。通过理论与实际测量数据的对比,认为采集系统的死时间为大约5 ns。

本文介绍的多通道时间分辨单光子探测系统,结合脉冲激光光源,可以应用于三维目标的光谱探测,或者透明介质的距离分辨光谱探测等应用。

参考文献

- [1] MALKAMAKI T, KAASALAINEN S, ILINCA J. Portable hyperspectral lidar utilizing 5 GHz multichannel full waveform digitization[J]. Optics Express, 2019, 27(8): A468-A480.
- [2] REICHARDT J. Cloud and aerosol spectroscopy with Raman lidar[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(9): 1946-1963.
- [3] SHOSHANIM O, BARATZ A. Daytime measurements of bioaerosol simulants using a hyperspectral laser-induced fluorescence LIDAR for biosphere research[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, 8(5): 104392.
- [4] HAKALA T, SUOMALAINEN J, KAASALAINEN. Full waveform active hyperspectral lidar[J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012, 39(B7): 459-462.
- [5] HU Peilun, CHEN Yuwei, JIANG Changhui, et al. Spectral observation and classification of typical tree species leaves based on indoor hyperspectral lidar[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020, 39(3): 372-380.
胡佩伦,陈育伟,蒋长辉,等.基于室内高光谱激光雷达的典型树种叶片光谱观测和分类[J].红外与毫米波学报, 2020, 39(3): 372-380.
- [6] SHU Rong, HUANG Genghua, KONG Wei. Development and review of space-based laser altimetry technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(11): 9-18.
舒嵘,黄庚华,孔伟.空间激光测高技术发展及展望[J].红外与激光工程, 2020, 49(11): 9-18.
- [7] JIA Hui, LOU Jianming, DING Zhiqun, et al. Study on the detecting system of dingle photon counting sepctormeter[J]. Acta Phontonica Sinica, 2014, 43(S1): 129-133.
贾辉,楼建明,丁志群,等.单光子计数光谱仪探测系统的研究[J].光子学报, 2014, 43(S1): 129-133.
- [8] ZHANG Yinchao, YAO Jiaojiao, DU Xianda, et al. 64-Channels single-particle fluorescence spectrum data acquisition system[J]. Optical Technique, 2019, 45(5): 562-567.
张寅超,姚娇娇,杜宪烜,等.64通道单粒子荧光光谱数据采集系统[J].光学技术, 2019, 45(5): 562-567.

-
- [9] SUGIMOTO Nobuo, HUANG Zhongwei, NISHIZAWA T, et al. Fluorescence from atmospheric aerosols observed with a multi-channel lidar spectrometer[J]. *Optics Express*, 2012, 20(19):20800-20807.
- [10] LIU Fuchao, FAN Yi. Lidar-measured atmospheric N₂ vibrational-rotational Raman spectra and consequent temperature retrieval[J]. *Optics Express*, 2014, 22(23):27833-27844.
- [11] PARSAKORDASIABI M, VORNICU I, RODRIGUEZ V A, et al. A low-resources TDC for multi-channel direct tof readout based on a 28-nm FPGA[J]. *Sensors*, 2021, 21(1):308.
- [12] KWIATKOWSKI P, SZPLET R. Efficient implementation of multiple time coding lines-based TDC in an FPGA device[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(10):7353-7364.
- [13] SRINIVASAN S K. Dead-time effects in photon counting statistics[J]. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 1978, 11(11):2333-2340.
- [14] CAI Zongqi, FENG Weiwei, WANG Chuanyuan. The study of oil film thickness measurement on water surface based on laser raman spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(6):1661-1664.
蔡宗岐,冯巍巍,王传远.基于激光拉曼光谱的水面油膜厚度测量方法研究[J].*光谱学与光谱分析*, 2018, 38(6):1661-1664.
- [15] WAN Wenbo, SU Junhong. Laser-induced plant chlorophyll fluorescence lifetime and spectral properties analysis [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(6):0630001.
万文博,苏俊宏.激光诱导植物叶绿素荧光寿命及光谱特性分析[J].*光子学报*, 2018, 47(6):0630001.