

模拟与光子计数融合的激光雷达信号采集系统设计

付毅宾^{1,2} 王 煜^{1*} 张天舒¹ 范广强¹ 刘文清¹ 常 振¹ 邱晓晗¹ 方玲丽^{1,2} 田禹泽^{1,2}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了扩展激光雷达的测量动态范围,设计了一种基于模拟与光子计数融合方法的信号采集系统。采用多级放大技术设计了用于模拟与光子计数融合方法的双通道前置放大器,并与通用数据采集卡和光子计数卡组成信号采集系统。利用激光雷达信号模拟源搭建了测试系统;通过测量坪特性和脉冲高度分布确定光电倍增管(PMT)的工作高压和鉴别电平;测试了模拟通道和光子计数通道的性能以及两个通道的可拼接性。实验结果表明,设计的信号采集系统性能优于 LICEL公司的瞬态记录仪 TR20-160;两个通道的信号具有较好的拼接性,通过两个信号的拼接提高了激光雷达信号采集系统的动态范围。

关键词 测量;激光雷达;信号采集系统;模拟与光子计数融合

中图分类号 TN958.98 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0814001

Signal Acquisition System with Simultaneous Analog and Photon Counting Measurement for Lidar

Fu Yibin^{1,2} Wang Yu¹ Zhang Tianshu¹ Fan Guangqiang¹ Liu Wenqing¹

Chang Zhen¹ Qiu Xiaohan¹ Fang Lingli^{1,2} Tian Yuze^{1,2}

¹Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to extend the dynamic range of the Lidar measurement, a signal acquisition system based on simultaneous analog and photon counting fusion method is designed. The signal acquisition system is comprised of the universal data acquisition card and universal photon counter card, a dual-channel preamplifier which is designed for the simultaneous analog and photon counting measurement by using the technique of multistage amplification. A testing system is configured with a Lidar signal simulation device. According to the plateau characteristics of the photomultiplier tube (PMT) and the differential pulse height distributions measured by the testing system, the supply voltage of the PMT and the discriminator level are selected. The performance of the analog channel and photon counting channel of the signal acquisition system and the practicability of gluing two channels are tested. Experimental results show that the designed signal acquisition system has better performance than TR20-160, the Lidar transient recorder from LICEL. The signals from two channels are suitable for being glued together, and the dynamic range of the Lidar signal acquisition system is extended by the gluing.

Key words measurement; Lidar; signal acquisition system; simultaneous analog and photon counting measurement

OCIS codes 280.3640; 040.5250; 030.5260; 120.0280

1 引 言

激光雷达作为一种主动遥感探测技术和工具已有几十年的历史,目前广泛用于地球科学、气象学、物理

收稿日期: 2015-01-28; 收到修改稿日期: 2015-03-31

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120024)

作者简介: 付毅宾(1985—),男,博士研究生,主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: ybfu@aiofm.ac.cn

导师简介: 王 煜(1970—),男,博士,研究员,主要从事电子学开发、光电信息获取、CCD成像光谱仪等方面的研究。

E-mail: yuwang@aiofm.ac.cn(通信联系人)

学、生物学与生态保持、天文学和军事等领域^[1],尤其是在大气污染物监测方面取得显著的发展。米散射激光雷达、偏振激光雷达、拉曼激光雷达和差分吸收激光雷达等多种大气环境监测激光雷达被广泛用于大气中颗粒物、水汽、云层和臭氧的监测^[2-5]。

大气环境监测激光雷达的信号获取方法一般为直接测量其后向散射信号的强度,然后利用测量结果反演出测量目标的时空分布^[6-7]。激光雷达后向散射信号较弱,因此信号采集系统的性能对激光雷达至关重要。激光雷达信号采集系统通常以光电倍增管(PMT)为探测器,常用的采集方法包括模拟方式和光子计数方式^[8]。模拟方式采用高速模数转换方法获取PMT输出的信号,适合测量相对较强的光信号,具有较好的线性;在光信号较为微弱时,由于采样速率和采样系统电噪声的影响,很难获得较高的信噪比(SNR)。光子计数方式是对单位时间内光子脉冲的个数进行统计,具有较高的灵敏度和信噪比。光子计数方式仅适用于光信号较弱时,PMT输出信号为一个个离散的光子脉冲的情况,无法用于测量较强的光信号。在光子数较多时,光子计数方式的结果会由于脉冲堆积效应而产生较大的非线性误差^[9],这就进一步限制了光子计数方式的有效测量范围。

激光雷达的后向散射信号是以距离平方呈反比快速减小的^[8],其动态范围比较大,仅仅采用模拟方式或光子计数方式,无法获得较高的测量性能。为了提高激光雷达信号采集系统的动态范围,模拟与光子计数融合的方法被用于激光雷达信号采集系统^[10-11]。这种方法对PMT输出的信号同时采用模拟和光子计数的方式进行采集;近场信号采用模拟信号,远场信号采用光子计数信号,将两种信号拼接成完整的测量结果。目前国内外采用模拟和光子计数融合方法的信号采集系统较常见的为LICEL公司的瞬态记录仪^[7,10-13],虽然探测性能较好,但是其价格比较昂贵,大大增加了激光雷达的成本。考虑到激光雷达产业化对性能和成本的要求,有必要研制一种具有高性价比和自主知识产权的激光雷达信号采集系统。此外,PMT的工作高压和光子计数器的鉴别电平对信号采集系统的性能影响较大。在使用LICEL公司的瞬态记录仪时,PMT的工作高压和光子计数器的鉴别电平多采用产品手册上的推荐值。目前,对于采用模拟和光子计数融合方法的信号采集系统,关于这两种参数选取方法的研究并不是很多,有必要对其进行研究。

本文基于模拟和光子计数融合方法设计了一套激光雷达信号采集系统。根据模拟和光子计数融合方法的需求,设计了PMT分压电路和双通道前置放大器,使单个PMT的输出信号可以被模数转换器(AD)和光子计数器同时采集。双通道前置放大器解决了PMT信号的分配问题,使用通用的数据采集卡(AD采集卡)和光子计数卡就可以构成基于模拟和光子计数融合方法的信号采集系统,从而降低了系统成本。通过建立的测试平台,对信号采集系统的坪区特性和脉冲高度分布(PHD)进行了测量;研究了基于坪区特性和PHD的PMT工作高压和鉴别电平选取方法。利用测试平台,对设计的信号采集系统和LICEL公司的瞬态记录仪进行了对比测试;并对系统中模拟信号和光子计数信号的可拼接性进行了验证。

2 信号采集系统设计

采用模拟和光子计数融合方法的信号采集系统包含两个采集通道:模拟直流信号采集通道和光子脉冲采集通道。信号采集系统的结构示意图如图1所示,系统由PMT、高压电源、分压电路、双通道前置放大器、AD采集卡和光子计数卡等构成。高压电源和分压电路为PMT的各个倍增极提供工作电压;PMT将激光雷达回波信号转换成电流信号。双通道前置放大器将PMT输出电流信号转换成电压信号,并分两路进行放大,一路为模

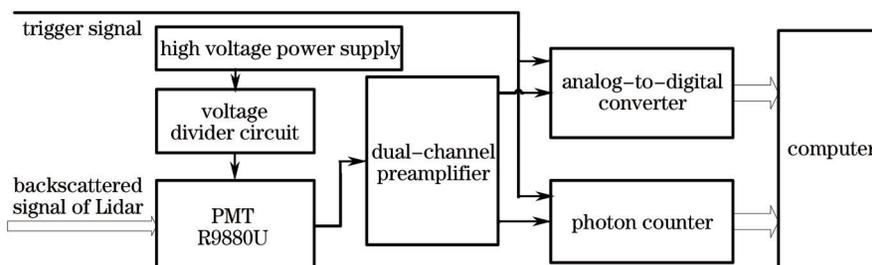


图1 信号采集系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the signal acquisition system

拟直流信号,一路为光子脉冲信号。AD采集卡对双通道前置放大器输出的模拟直流信号进行采集,光子计数卡对双通道前置放大器输出的光子脉冲信号进行计数。触发信号与激光脉冲同步,AD采集卡和光子计数卡通过触发信号实现同步采集。AD采集卡和光子计数卡的测量结果通过计算机处理软件进行拼接。

AD采集卡选用凌华公司的高速数据采集卡PCI-9846,采样速率为20 MHz,AD分辨率为16位,4个通道同步采集,能够满足激光雷达的多通道数据采集需求。光子计数卡选用自制的PHC-1-50型光子计数器,时间分辨率为50 ns,鉴别器带宽为300 MHz,鉴别电平有4096级,软件可调。PMT分压电路和双通道前置放大器需要根据模拟和光子计数融合方法的需求进行专门设计。

2.1 PMT分压电路设计

PMT选用Hamamatsu公司的R9880U,中心波长为400 nm,光谱响应范围为230~700 nm,典型增益为 2×10^6 ,最大输出平均电流为0.1 mA。R9880U的光谱响应范围能够满足紫外到可见波段的激光雷达信号探测。用于模拟和光子计数融合方法的PMT应能够同时工作在直流模式和光子计数模式。因此,PMT分压电路的电路结构应采用阳极接地、阴极加负高压的方式。这样,PMT的阳极与地之间就没有高压,从而使PMT阳极可以直接输出直流信号和脉冲信号。另外,为了减小PMT光子脉冲的振荡,在最后一个倍增极与分压电路之间串入阻尼电阻。图2(a)为没有串入阻尼电阻时PMT光子脉冲的波形,在光子脉冲的后沿有较大的振荡,在光子计数时可能会引起误计数。图2(b)为串入阻尼电阻时,PMT光子脉冲的波形;可见,阻尼电阻大大减弱了光子脉冲的振荡。阻尼电阻的取值一般通过观测不同阻值下的光子脉冲波形来确定;通过实验,阻尼电阻取值为120 Ω ,图2(b)就是串入120 Ω 之后波形。

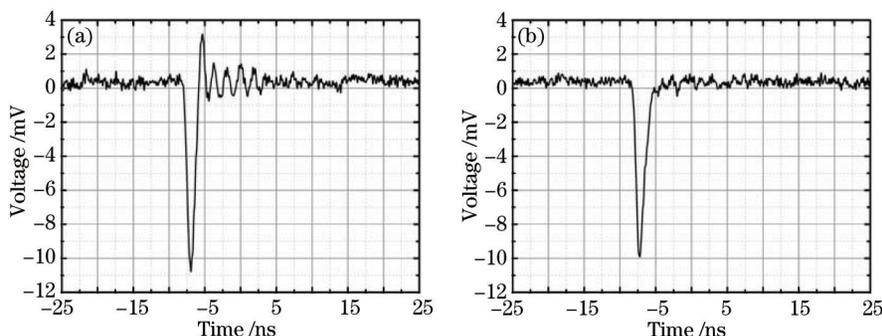


图2 PMT输出的单光子脉冲波形。(a)未串阻尼电阻;(b)串入阻尼电阻

Fig.2 Single photon pulse waveforms from PMT . (a) Without the damping resistor; (b) with the damping resistor

2.2 双通道前置放大器设计

双通道前置放大器使单个PMT的输出信号可以同时被AD采集卡和光子计数卡采集,是信号采集系统的核心。双通道前置放大器的结构示意图如图3所示,PMT输出电流信号由电流电压转换器转换成电压信号,隔离电路将电压信号分配到模拟直流信号放大器和脉冲信号放大器,隔离电路将两个放大器电路隔离,防止相互影响;两个放大器电路将信号放大后分别输出模拟直流信号和光子脉冲信号。

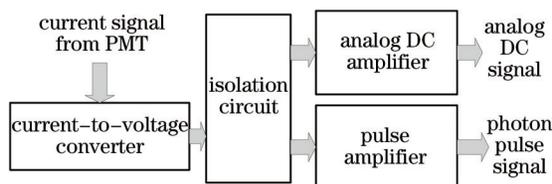


图3 双通道前置放大器结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the dual-channel preamplifier

电流电压转换器采用负载电阻,负载电阻的阻值应同时满足PMT输出信号中的模拟直流信号和光子脉冲信号的要求。为了保证PMT模拟直流信号的线性,负载电阻阻值不宜过大。过大的负载电阻会使阳极电压较大,导致最后一级倍增极与阳极之间的电压下降,使模拟直流信号的线性变差。对于光子脉冲信号,选择负载电阻时应考虑其频率特性;由于各种因素引起的与负载电阻并联的杂散电容的存在,负载电阻的阻值不能过大,否则会使PMT的时间响应特性变坏。PMT的输出信号通过50 Ω 特征阻抗的同轴电缆与双通道

前置放大器连接。光子脉冲信号为高速信号,其上升、下降时间小于 2 ns。为了使光子脉冲信号波形在传输时不失真,负载电阻必须与同轴电缆的特征阻抗相匹配。根据上述分析,将负载电阻的阻值选为 50 Ω。

模拟直流信号放大器应具有较好的线性和较小的电噪声。目前,常用激光雷达数据采集系统的采样频率多在 20 MHz 或 40 MHz,将模拟放大通道的带宽设计为 20 MHz,就可以满足模拟直流信号的带宽要求;放大器的带宽过大会增大模拟直流信号的噪声。模拟放大通道的放大倍数和偏置电压均设计为可调,使用时可以根据 PMT 输出直流信号大小和 AD 采集卡的测量范围进行调整。

脉冲信号放大器的放大倍数和带宽可根据 PMT 输出光子脉冲信号的幅度和带宽确定。由于 PMT 倍增极电子发射系数的离散性,每个光子脉冲的幅度是不一样的,分布在一个范围内。光子脉冲幅度的理论计算公式为^[14]

$$v_0 = \frac{R_l \times e \times \mu}{t}, \quad (1)$$

式中阳极负载电阻 $R_l=50 \Omega$, 电子电荷 $e=1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, 光子脉冲的半峰全宽 t 约为 1.34 ns, PMT 工作高压为 1000 V 时的典型增益 $\mu=2.0 \times 10^6$, 计算得到的脉冲幅度理论值为 11.9 mV。因此,将脉冲信号放大器的放大倍数设计为 20, 对应放大后的光子脉冲幅度理论值为 239 mV。这样幅度的脉冲已经可以直接由光子计数卡进行计数。PMT 输出的光子脉冲的信号带宽估算公式为^[8]

$$f_{3db} = 0.35/t_r, \quad (2)$$

式中 t_r 为光子脉冲上升时间,约为 1.3 ns, 计算得到光子脉冲的信号带宽约为 270 MHz。因此,脉冲信号放大器的带宽设计为 300 MHz, 就可以满足光子脉冲信号的带宽要求。

双通道前置放大器电路原理图如图 4 所示,放大器电路由集成运算放大器芯片构成。信号隔离电路由两个不同带宽的电压跟随器组成。为了兼顾放大倍数和带宽的要求,放大电路采用多级放大结构。模拟直流信号放大电路选用 50 MHz 的低噪声电压反馈放大器 AD827, 构成 3 级放大电路,每一级的放大倍数均可以通过反馈电阻进行调节。脉冲信号放大电路选用的芯片为高速运算放大器 LMH6702 和 THS3202。LMH6702 的带宽为 1.7 GHz, THS3202 的带宽为 2 GHz。脉冲信号放大电路由两级放大器构成;第一级由 LMH6702 实现 2 倍反相放大;第二级由 THS3202 实现 10 倍同相放大。

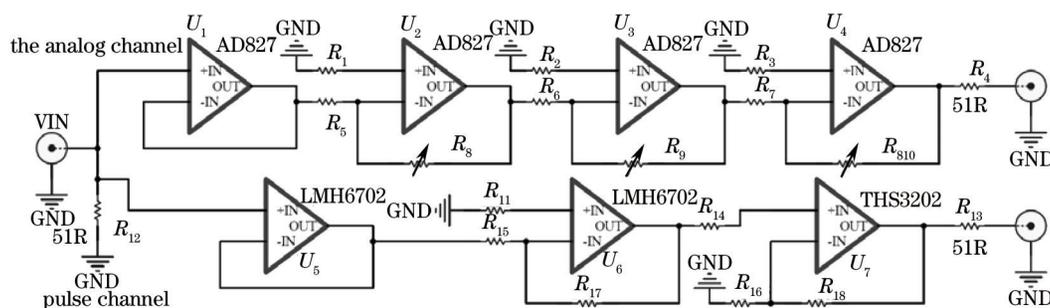


图 4 双通道前置放大器的电路原理图

Fig.4 Schematic diagram of the dual-channel preamplifier circuit

3 信号采集系统测试平台

测试平台示意图如图 5 所示。发光二极管(LED)放置在准直透镜的焦点处,入射光经过小孔光阑、准直透镜变为平行光,平行光经过中性滤光片衰减,通过窄带滤光片均匀入射到 PMT。通过调整 LED 的供电电压和中性滤光片的透过率,可以对输出的光信号强度进行调节。信号发生器的同步脉冲作为信号采集系统的触发信号。直流电源驱动 LED 时,信号模拟源输出连续不变光信号;信号发生器输出脉冲信号驱动 LED 时,信号模拟源输出与激光雷达回波信号类似的脉冲光信号。信号采集系统对信号模拟源发出的光信号进行测量,并可以与 LICEL 公司的瞬态记录仪 TR20-160 进行对比测量。TR20-160 是一种采用模拟和光子计数融合方法的激光雷达信号采集系统。模拟通道采样频率为 20 MHz, AD 分辨率为 12 位,信号带宽为 10 MHz。光子计数通道时间分辨率为 50 ns, 鉴别器带宽为 300 MHz, 鉴别电平有 64 级,软件可调。

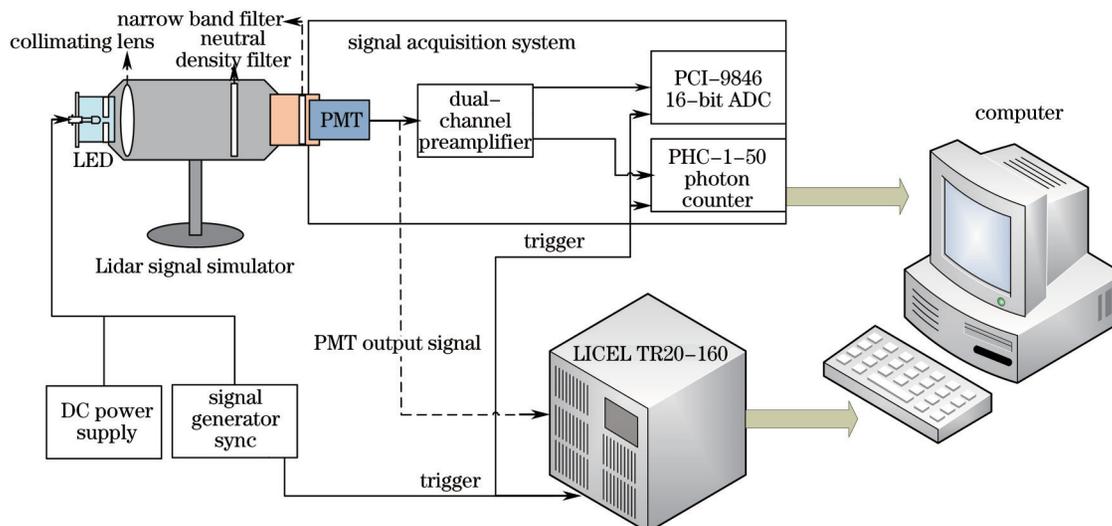


图5 信号采集系统测试平台

Fig.5 Testing platform for the signal acquisition system

4 测试结果与分析

4.1 PMT工作高压与光子计数通道鉴别电平的确

PMT的工作高压决定了其探测性能。用于模拟和光子计数融合方法的PMT在选择工作高压时,需要综合考虑模拟通道和光子计数通道的要求。对于模拟通道,PMT工作高压影响其输出电流大小。工作高压不能使PMT输出平均电流超过其最大平均输出电流,同时还应该使PMT具有足够的增益。对于光子计数通道,PMT的工作高压决定了光子计数通道的PHD和SNR。PMT的工作高压应使光子计数通道具有较高的信噪比,同时使光子计数通道的PHD具有明显的单光子峰。只有具备明显单光子峰的PMT才能用于光子计数。因此,PMT的工作高压主要是根据光子计数通道的要求进行选择的。而对于模拟通道的PMT最大平均输出电流限制,可以通过调整激光雷达后向散射信号的强度来满足。

在入射光强不变的情况下,光子计数率会随着PMT工作高压的增加而增大,而PMT的暗计数率也会随着工作高压的增加而增大。但随着工作高压的持续增加,光子计数率将会出现缓慢变化的坪区,一般PMT的工作电压选在坪区内^[5]。利用图5的测试平台对信号采集系统的坪区特性进行测量,图6为实测的PMT坪区特性。由图6(a)信号曲线可知,在850~1000 V之间曲线具有一个较平坦的区域;为了获得较高的计数稳定性,PMT工作高压应选择在这个区域内。由图6(b)噪声曲线可知,在工作高压大于等于950 V时,暗计数增加较快,因此工作高压应小于950 V。由图6(c)的信噪比曲线可知,PMT的信噪比随着工作高压的增大而减小,因此,PMT的工作高压应选择坪区内较小的电压值。由上述分析可知,为了获得较好的信噪比和计数稳定性,PMT工作高压应在850~950 V之间,一般应选择较小的850 V为宜。

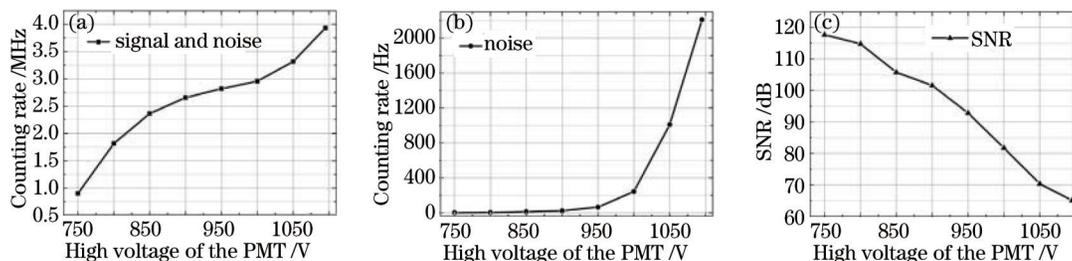


图6 实测PMT的坪区特性。(a)信号曲线;(b)噪声曲线;(c)信噪比曲线

Fig.6 Measured plateaus characteristics of the PMT. (a) Curve of the signal; (b) curve of the noise; (c) curve of SNR

在利用坪区特性初步确定了PMT的工作高压后,还需要对光子计数通道的PHD曲线进行测量。如果PHD曲线没有单光子峰,那么还需要在坪区内选择其他电压值。利用图5测试平台对光子计数通道的PHD

进行测量。将信号模拟源 LED 的电压设为恒定电压, PMT 入射连续不变微弱光信号, 鉴别电平以 1.2 mV 为间隔由小到大递增, 测得 PHD 积分曲线; 通过对 PHD 积分曲线取微分间接获得 PHD 曲线^[15-16]。图 7 为测得的 PHD 曲线, 在工作高压为 850、900 和 950 V 时, PHD 曲线都具有明显的单光子峰和波谷。因此, 将工作高压选择在 850 V 是可以的。由图 7 可以看出, 随着工作高压的增加, 单光子峰和波谷都向右移。如果在当前工作高压下 PMT 的 PHD 曲线没有明显的单光子峰, 那么就需要提高其工作高压, 直到获得明显的单光子峰。

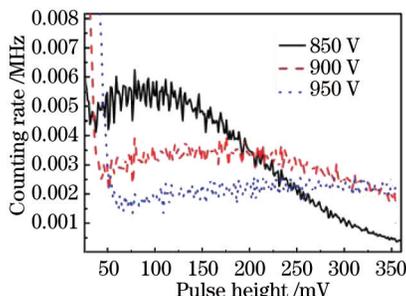


图 7 不同高压下的 PHD 曲线

Fig.7 PHD curves with different high voltages

鉴别电平是光子计数系统的重要参数, 合理选择鉴别电平可以获得较高的信噪比。光子计数系统的鉴别电平一般根据其 PHD 曲线进行选择。鉴别电平应选择在 PHD 曲线的波谷, 这样可以将大部分热电子脉冲和电噪声滤除, 从而获得较高的信噪比^[16]。由图 7 的 PHD 曲线可知, 当工作高压为 850 V 时, 单光子峰峰值对应脉冲高度为 84 mV, 其信号与热噪声分界的谷值在 32~35 mV 之间, 鉴别电平应选在 32~35 mV 之间。当工作高压为 900 V 时, 鉴别电平应选在 PHD 曲线的谷值 43~48 mV 之间。当工作高压为 950 V 时, 鉴别电平应选在 PHD 曲线的谷值 61~67 mV 之间。可见, 不同的 PMT 工作高压, 光子计数通道的鉴别电平也是不同的。

此外, 在 R9880U 的实际使用过程中发现, 同一型号 PMT 的阴极灵敏度基本一致, 而其阳极灵敏度具有较大的离散性, 最大的甚至可以相差 10 倍。这就说明, 即使同一型号的 PMT, 其增益的电压特性也是有差异的。如果 PMT 的阳极灵敏度相差不大, 其工作高压和鉴别电平参数是可以通用的; 如果相差较大, 就需要分别对两个 PMT 的工作高压和鉴别电平参数进行选取。

4.2 模拟通道与光子计数通道的测试

信噪比是信号采集系统的关键性能指标, 因此, 模拟通道和光子计数通道的测试主要是测量信号噪声的大小。测量方法为: 信号模拟源的 LED 由直流电源驱动, 输出连续不变光信号, 信号采集系统对光信号进行测量, 分别获得一组模拟信号和一组光子计数信号; 通过计算两组信号的平均值和标准差, 就可以获得两个通道的测量值与噪声; 平均值与光信号的强度对应, 标准差与测量结果中噪声的大小对应。一般激光雷达的信号采集使用多次累加方法, 因此, 实验中测得的数据均为累加之后的结果。

实验中, PMT 工作高压设为 850 V, 累加次数设为 2000 次, 信号模拟源的 LED 驱动电压由小到大递增。在每种电压下, 信号采集系统与 TR20-160 分别对 PMT 输出的信号进行采集。图 8 为两种信号采集系统模拟通道的测量结果。由图 8(a)可知, 两种系统的模拟通道测量结果基本一致。由图 8(b)可知, 所设计的信号

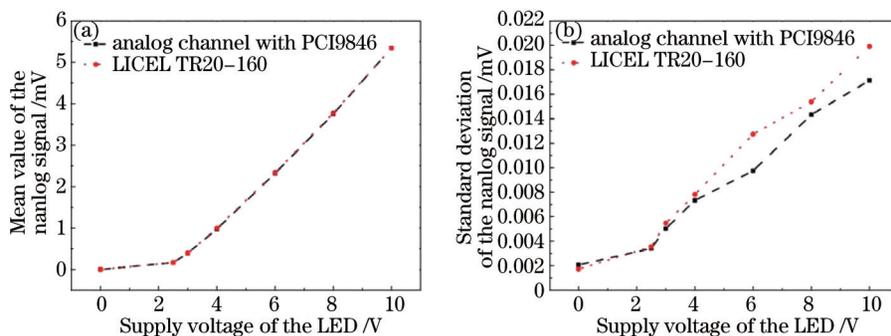


图 8 模拟通道的测量结果。(a) 测量结果平均值; (b) 测量结果的标准差

Fig.8 Results of the analog channel. (a) Mean of the results; (b) standard deviation of the results

采集系统的模拟通道噪声小于TR20-160的噪声。因此,与TR20-160相比,所设计的信号采集系统的模拟通道具有更高的信噪比。

图9为两种信号采集系统光子计数通道的测量结果。两个系统光子计数通道的测量结果的平均计数率和标准差基本一样,所设计的信号采集系统的光子计数通道具有与TR20-160相当的性能。

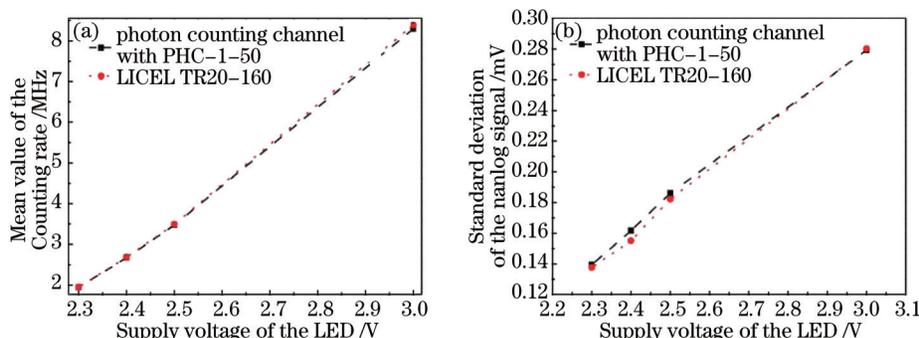


图9 光子计数通道的测量结果。(a) 测量结果平均值; (b) 测量结果的标准差

Fig.9 Results of the photon counting channel. (a) Mean of the results; (b) standard deviation of the results

4.3 模拟信号与光子计数信号的拼接

所设计的信号采集系统采用模拟与光子计数融合方法,因此需要对信号采集系统的模拟通道和光子计数通道的测量结果的可拼接性进行验证。模拟信号与光子计数信号拼接过程一般为:1) 信号背景扣除;2) 通道之间的时间延迟修正;3) 光子计数信号的非线性校正;4) 将模拟信号电压值转换成光子计数率;5) 选择一个合适的拼接点,将两个信号拼接在一起^[10-11,17]。实验时,由信号发生器输出 20 Hz 的三角波脉冲驱动信号模拟源的 LED,信号模拟源输出与激光雷达回波信号类似的脉冲光信号。该信号采集系统对信号模拟源发出的脉冲光信号进行测量,然后对两个通道的测量结果进行拼接。测量时 PMT 工作高压设定为 850 V,对应光子计数通道的鉴别电平设置为 34 mV,两个通道的累加次数为 2000 次。图 10 为两个通道的测量结果。可见,两个通道测得的信号波形都与三角波类似。

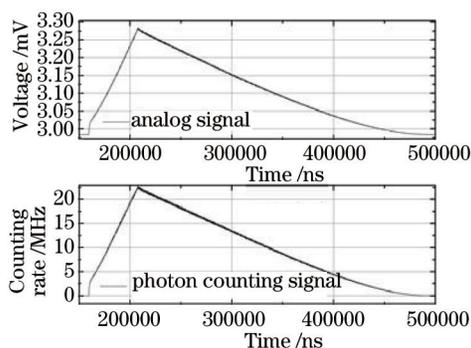


图10 测得的模拟信号与光子计数信号

Fig.10 Observed analog signal and photon counting signal

1) 对测得的两个信号进行背景噪声扣除,主要是将两个信号中的天空背景辐射、PMT 噪声和电路噪声扣除,一般将没有输出激光时或者非常远的距离测到的信号平均值作为原始信号的背景噪声加以扣除。由于测量信号由信号模拟源发出,只需要减去三角波中电压为 0 的那一段时间测得信号的平均值即可。

2) 两个信号之间的时间延迟修正。虽然两个通道由同一触发信号同步触发,但是由于两个通道电路时序的不同,两个信号之间可能存在时间延迟,拼接前需要对这个延迟进行修正。一般是利用两个信号中云层信号峰值位置差异来确定延迟时间。但是用于测试的信号无法模拟云层信号,因此可以通过观察两个信号的信号细节来确定延迟量。

3) 光子计数信号的非线性校正。采用死时间校正方法^[10-11,17]:

$$S = \frac{N}{1 - N \times \tau_d}, \quad (3)$$

式中 S 表示真实计数值, N 表示实际测得的计数值, τ_d 为光子计数系统的死时间, 与脉冲宽度有关, 所设计的光子计数通道的死时间为 4 ns。

4) 将模拟信号电压值转换为光子计数率。方法为: 在两个信号中选择一段拼接区, 在这个区域内两个信号都应具有较好的线性, 对光子计数信号和模拟信号进行最小二乘法拟合, 拟合方法为^[12,17]

$$\sum_{i=1}^n \{P_c(i) - [A \times U(i) + B]\}^2 = M_{\min}, \quad (4)$$

式中 $P_c(i)$ 为和 $U(i)$ 分别为光子计数信号和模拟信号, A 和 B 为转换系数。在求得参数 A 和 B 后, 就可以将模拟信号的电压值换算成光子计数率。

5) 选择一个合适的拼接点, 将两个信号拼接在一起。拼接区一般选在光子计数率为 2~10 MHz 的区间, 这一段的光子计数信号线性度较好, 脉冲堆积效应可以忽略, 而模拟信号也具有较好的线性。图 11 为转换为计数率的模拟信号与死时间校正后的光子计数信号在 4~4.7 MHz 之间的信号细节。比较两个信号的信号跳动, 可以发现两个信号之间具有非常高的相关性。

图 12 为转换成计数率的模拟信号与非线性校正前后的光子计数信号中大于 15 MHz 的数据段。对比图 12 中的模拟信号和光子计数信号可以发现, 光子计数信号的死时间校正减小了非线性误差, 但是与线性较好的模拟信号相比, 校正后的光子计数信号依然存在较大误差。另外, 模拟信号的噪声明显小于光子计数信号的噪声。因此, 在光信号较强时, 模拟通道的线性和信噪比都优于光子计数通道。

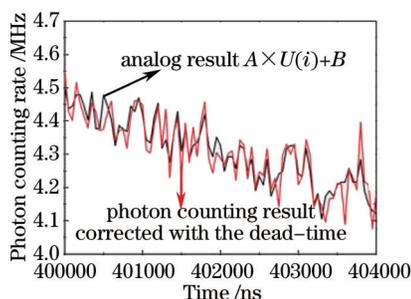


图 11 拼接区的模拟信号与光子计数信号
Fig.11 Analog signal and the photon counting signal in the gluing region

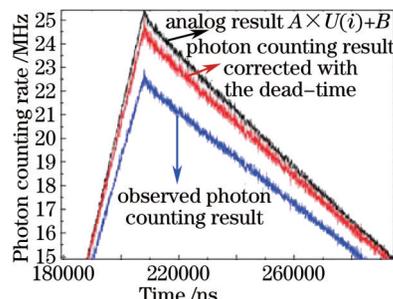


图 12 计数率大于 15 MHz 的测量结果
Fig.12 Measurement results greater than 15 MHz

图 13 为转换成计数率的模拟信号和死时间校正后的光子计数信号中小于 0.2 MHz 的数据段。由图 13 可知, 大约在 48600 ns 之前, 模拟信号的噪声略小于光子计数信号的噪声; 在 48600 ns 之后, 光子计数信号的噪声明显小于模拟信号的噪声。光子计数信号在光信号较弱时具有更高的信噪比。拼接时可以将拼接点选在 48600 ns 处; 在 48600 ns 之前采用模拟信号, 在 48600 ns 之后采用光子计数信号, 从而拼接出完整的一组信号。

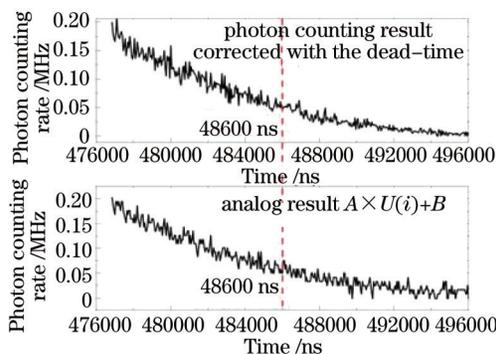


图 13 计数率小于 0.2 MHz 的测量结果
Fig.13 Measurement results less than 0.2 MHz

由上述分析可知, 信号采集系统测到的模拟信号和光子计数信号在线性区具有较好的相关性, 可以用于拼接。光信号较强时, 模拟信号具有较好的线性和信噪比; 光信号较弱时, 光子计数信号具有较好的信噪比。通过拼接, 可以扩展信号采集系统的测量动态范围。

5 结 论

设计了一种采用模拟和光子计数融合方法的激光雷达信号采集系统。系统采用自主设计的PMT分压电路和双通道前置放大器,解决了单个PMT信号分配问题;采用通用AD采集卡和光子计数卡为采集单元,降低了系统成本。搭建了测试平台,研究了PMT工作高压与光子计数通道鉴别电平的选择方法,并对信号采集系统进行了测试。测试结果表明,信号采集系统的模拟通道性能优于LICEL公司的TR20-160的性能;光子计数通道性能与TR20-160的性能相当。模拟通道与光子计数通道的测量结果具有较好的可拼接性。在信号较强时,模拟信号具有更好的信噪比和线性;在信号较弱时,光子计数信号具有更好的信噪比。通过两个信号的拼接,使信号采集系统获得更好的测量性能和更大的测量动态范围。该激光雷达信号采集系统具有较高的性价比,可以满足各种大气环境监测激光雷达的信号采集需求。

参 考 文 献

- 1 Hua Dengxin, Song Xiaoquan. Advances in lidar remote sensing techniques[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(S3): 21-27.
华灯鑫, 宋小全. 先进激光雷达探测技术研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(S3): 21-27.
- 2 Xie Chenbo, Zhou Jun, Yue Guming, *et al.*. New mobile Raman Lidar for measurement of tropospheric water vapor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(9): 1281-1286.
谢晨波, 周 军, 岳古明, 等. 新型车载式拉曼激光雷达测量对流层水汽[J]. *光学学报*, 2006, 26(9): 1281-1286.
- 3 Fan Guangqiang, Zhang Tianshu, Fu Yibin, *et al.*. Temporal and spatial distribution characteristics of ozone based on differential absorption lidar in Beijing[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1014003.
范广强, 张天舒, 付毅宾, 等. 差分吸收激光雷达监测北京灰霾天臭氧时空分布特征[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1014003.
- 4 Ji Chengli, Tao Zongming, Hu Shunxing, *et al.*. Cirrus measurement using three-wavelength lidar in Hefei[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0401001.
季承荔, 陶宗明, 胡顺星, 等. 三波长激光雷达探测合肥地区卷云特性[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0401001.
- 5 He Tao, Hou Lujian, Lü Bo, *et al.*. Study of accuracy of lidar inversion PM2.5 concentration[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0113001.
何 涛, 侯鲁健, 吕 波, 等. 激光雷达探测反演PM2.5浓度的精度研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0113001.
- 6 Fan Guangqiang, Liu Jianguo, Chen Zhenyi, *et al.*. A differential absorption lidar system for tropospheric ozone monitoring[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1113001.
范广强, 刘建国, 陈臻懿, 等. 一套测量对流层臭氧的差分吸收激光雷达系统[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1113001.
- 7 Liu Dong, Tao Zongming, Wu Decheng, *et al.*. Development of three-wavelength-Raman-polarization lidar system and case study[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0228001.
刘 东, 陶宗明, 吴德成, 等. 三波长拉曼偏振激光雷达系统研制及探测个例[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0228001.
- 8 V A Kovalev, W E Eichinger. *Elastic Lidar*[M]. Hoboken: Wiley, 2004: 123-137.
- 9 D P Donovan, J A Whiteway, A I Carswell. Correction for nonlinear photon-counting effects in lidar systems[J]. *Appl Opt*, 1993, 32(33): 6742-6753.
- 10 R K Newsom, D D Turner, Bernd Mielke, *et al.*. Simultaneous analog and photon counting detection for Raman Lidar[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(20): 3903-3914.
- 11 Y Zhang, F Yi, W Kong, *et al.*. Slope characterization in combining analog and photon count data from atmospheric Lidar measurements[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(31): 7312-7320.
- 12 Zhishen Liu, Zhigang Li, Bingyi Liu, *et al.*. Analysis of saturation signal correction of the troposphere Lidar[J]. *Chin Opt Lett*, 2009, 7(11): 1051-1054.
- 13 Guan Sai, Yang Guotao, Cheng Xuewu, *et al.*. New methods of signal-induced noise deduction for rayleigh scattering Lidar in temperature measurement[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0713001.
关 塞, 杨国韬, 程学武, 等. 瑞利散射激光雷达强光感生噪声修正的新方法及大气温度探测[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0713001.
- 14 Wolfgang Becker. *Advanced Time-Correlated Single Photon Counting Techniques*[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 2005: 222-223.
- 15 Li Shichun, Hua Dengxin, Xin Wenhui, *et al.*. A photoelectric detection system for all-fiber rotational Raman lidar[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2013, 24(5): 855-861.
李仕春, 华灯鑫, 辛文辉, 等. 全光纤转动拉曼激光雷达光电探测系统设计[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(5): 855-861.

- 16 Man Jing, Wu Dong. The method of measuring the PHD of photomultiplier tubes[J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(S2): 141-144.
满 静, 吴 东. 光电倍增管的 PHD 特性测量方法[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(S2): 141-144.
- 17 Fan Guangqiang. Studies of the Differential Absorption Lidar for Tropospheric Ozone Monitoring[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012: 65-70.
范广强. 差分吸收激光雷达探测对流层臭氧技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012: 65-70.

栏目编辑: 苏 岑