

多通道单脉冲激光能量变化监测方法

闫文兵^{1,2}, 杨勇^{1*}, 季凯俊^{1,2}, 叶晖^{1,2,3}, 程学武¹, 杨国韬⁴, 刘中正^{1,2}, 王积勤^{1,2},
林鑫¹, 宋沙磊¹, 郑金州¹, 肖亦然¹, 杜丽芳⁴, 李发泉¹

¹中国科学院精密测量科学与技术创新研究院波谱与原子分子物理国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³上海卫星工程研究所, 上海 201109;

⁴中国科学院国家空间科学中心空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

摘要 提出一种多通道单脉冲激光能量变化的监测方法,用于实时监测脉冲激光的状态。首先采用多合一光纤束,对待测激光进行取样;再经过消色差透镜将光纤合束端面成像到 CMOS 图像传感器的感光面,通过软件获取光斑图像并提取不同光斑的灰度值,以表征脉冲激光能量;最后根据各待测激光总能量大小对灰度值进行标定,即可实现不同位置处激光能量变化的同时在线监测。利用该方法,对全高程全天时大气探测激光雷达系统中 1064, 532, 589 nm 激光以及脉冲染料激光器中自发辐射 (ASE) 荧光的单脉冲能量变化进行了长时间同时在线监测,得到了激光雷达运行过程中这 4 束光单脉冲能量的变化情况,并根据监测结果计算了倍频晶体的倍频效率、脉冲染料激光器的转换效率及 ASE 比例系数。该研究为需要对多路激光单脉冲能量变化进行同时在线监测的光电系统提供了一种有效的解决方法。

关键词 激光光学; 单脉冲; 激光能量; 多通道; CMOS

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1201004

Multichannel Single-Pulse Laser Energy Monitoring Methodology

Yan Wenbing^{1,2}, Yang Yong^{1*}, Ji Kaijun^{1,2}, Ye Hui^{1,2,3}, Cheng Xuewu¹, Yang Guotao⁴,
Liu Zhongzheng^{1,2}, Wang Jiqin^{1,2}, Lin Xin¹, Song Shalei¹, Zheng Jinzhou¹,
Xiao Yiran¹, Du Lifang⁴, Li Faquan¹

¹State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

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

³Shanghai Institution of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China;

⁴State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract This paper proposes a multichannel single-pulse laser energy monitoring methodology to realize real-time monitoring of the laser pulse energy at different laser transmitter positions. The sample laser pulse is coupled with an all-in-one optical fiber bundle and imaged onto a CMOS photosensitive surface through an achromatic lens. A software is used to enable real-time identification and calculation of the grayscale values in the CMOS image for each laser pulse. The grayscale value is adjusted to obtain the laser pulse energy. Using the proposed methodology, a long-term and simultaneous monitoring of single-pulse energy of 1064, 532, and 589 nm lasers as well as amplified spontaneous emission (ASE) fluorescence in the 1–110 km diurnal atmospheric lidar can be achieved. The efficiency of the secondary harmonic generation, conversion efficiency of the pulsed dye laser, and ASE ratio can be obtained based on the measurements of the laser pulse energy. This methodology can be advantageous for the laser system,

收稿日期: 2020-06-23; 修回日期: 2020-07-16; 录用日期: 2020-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(41827801, 41627804)、国家重点研发计划(2016YFC1400300)

*E-mail: yangyong@apm.ac.cn

which monitors the multichannel single-pulse energy.

Key words laser optics; single-pulse; laser energy; multichannel; CMOS

OCI Scores 140.3538; 140.3280; 140.3425

1 引 言

大气探测激光雷达利用多波长、高能量脉冲激光作为发射光源,采用了种子注入、稳频、倍频、调Q、脉冲放大等一系列激光技术^[1-3]。为了实现脉冲激光的长期稳定输出,需要对激光的倍频效率、波长漂移、脉冲能量等多个激光状态参数进行在线监测^[4]。在多个环节对激光状态进行同时在线监测,有助于激光雷达运行状态的实时监测与快速诊断,监测数据还可为激光雷达数据反演修正提供依据^[5-6]。通常情况下,波长漂移、倍频效率等激光状态参数的监测都可以通过测量脉冲激光能量来实现。

测量激光脉冲能量常用的仪器有热传感器、热释电探测器和半导体光电点探测器。热传感器在激光脉冲照射下需要2~4 s的时间才能达到热平衡状态,因此可以实现平均能量的测量,但不能测量单个脉冲的能量。热释电探测器和半导体光电点探测器具有极快的响应速率,被广泛应用于激光单脉冲测量中^[7]。常见的测量方法有:基于高速采样保持电路的脉冲峰值测量^[6, 8-9]、基于高速模数转换器(ADC)的脉冲波形采集测量^[10-11]和基于取样积分原理的脉冲平均值测量^[12]。采用这些方法虽然可以实现单路脉冲激光能量变化的监测,但是一个探测器只能实现单路脉冲激光能量变化的监测,若要实现对多路待测光同时监测,需要增加相应的硬件和软件配置。这在增加监测成本的同时,还会因不同的探测设备间的误差,影响探测结果。

为实现多路激光单脉冲能量变化的同时在线监测,胡云等^[13]采用分时法,对激光进行分束、延时、合束,实现了多路激光脉冲能量和波形的同时在线监测。但是这种方法单位时间内依旧只是采集到一路能量/波形信号,不能同时获取多路信号。张彦梅等^[14]采用多路高速数模(AD)采集技术,实现了6路脉冲激光的同时在线监测,但是这种方法难以实现不同位置处激光的分布式采集。此外,上述两种多路脉冲激光能量监测方法,均采用半导体光电点探测器探测激光单脉冲能量,这类点探测器对一个脉冲只能进行一次探测,结果随机误差较大,为了减小随机误差,需要多次重复测量^[15]。

为在线监测大气探测激光雷达的激光状态参

数,本文提出了一种多通道单脉冲激光能量变化监测方法。该方法对各路待测脉冲光进行取样并耦合进入多合一光纤束;使用消色差透镜将光纤束的输出端成像在CMOS图像传感器的不同像元上,以实现各路取样光的空间分离,并获取光斑图像^[16]。利用该方法,对全高程全天时大气探测激光雷达系统的1064,532,589 nm激光,以及532 nm激光抽运脉冲染料激光器时产生的自发辐射荧光(ASE)的单脉冲能量变化进行了长时间同时在线监测,得到了激光雷达运行过程中这4束光单脉冲能量的变化情况,并根据监测结果计算了倍频晶体的倍频效率、脉冲染料激光器的转换效率及ASE的比例系数。本文为高度复杂的脉冲激光系统提供了一种有效的多通道单脉冲能量变化在线监测手段。

2 多通道单脉冲激光能量变化监测装置与方法

多通道单脉冲激光能量变化监测装置由多通道光学成像单元和数据采集与处理单元组成,如图1所示。其中,多通道光学成像单元包括光纤耦合镜、多合一光纤束、消色差透镜、CMOS图像传感器。多合一光纤束中光纤间未熔接,只是并排放置在一起。根据光纤束的出射端面,可以从空间上区分出各根光纤。每一束待测激光分别耦合进入多合一光纤束中的一根光纤,从光纤束中出射的激光通过消色差透镜成像到CMOS图像传感器的不同位置上,形成多个光斑,并利用激光器产生的触发信号同步触发CMOS图像传感器,获取光斑图像。数据采集与处理单元采集光斑图像并提取光斑灰度值,根据激光总能量对光斑灰度值进行标定并将实时数据进行显示与存储。

2.1 多通道光学成像单元

多通道光学成像单元用于实现多束待测脉冲激光的取样、传输、成像以及独立探测。在对待测光取样监测时,为实现不同位置处待测光的集中采集,采用多合一光纤束对不同位置处的光进行分布式取样。多合一光纤束纤芯数及纤芯排布可根据实际需求定制。利用消色差透镜对各个波长的光束进行成像,使得本方法具有从紫外波段到近红外波段同时监测的能力。CCD和CMOS等图像传感器具有像素多且可以接收脉冲触发同步的特点,适合用于同

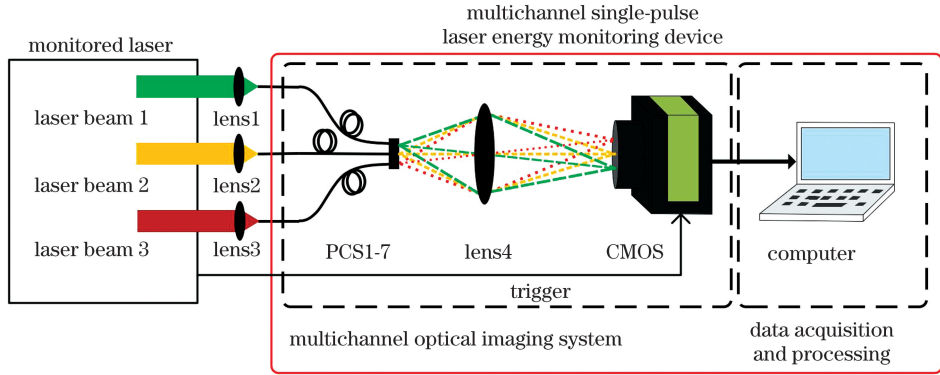


图 1 多通道单脉冲激光能量变化监测装置

Fig.1 Multichannel single-pulse laser energy change monitoring device

时测量多束脉冲激光。为了充分利用 CMOS 图像传感器的感光面,设置放大率,使得光斑直径占 CMOS 感光面边长的 90%。

本文定制了 PCS1-7 和 PCS1-50 两种多合一光纤束,并采用消色差透镜(型号为 AC254-030-AB)和 CMOS 图像传感器(型号为 JHUM36Bs,像元深度为 8 bit)搭建了多通道光学成像单元,各元器件的主要出厂参数如表 1 所示。CMOS 的光谱响应

范围在可见、近红外波段,覆盖了 Nd:YAG 激光器的相关波长。CMOS 可以接收外触发信号,CMOS 工作时帧频与外触发信号的频率保持一致。设置 CMOS 的曝光时间,要求曝光时间大于激光脉冲宽度、CMOS 的最短曝光时间以及触发信号与光脉冲的时间间隔,并小于激光脉冲间隔以及 CMOS 的最长曝光时间。考虑到曝光时间越短,环境光引入的噪声越少,本文实验中将 CMOS 的曝光时间设为 1 ms。

表 1 多通道光学成像单元参数

Table1 Parameters of multichannel optical imaging unit

| Device component | Parameter |
|------------------|---|
| Fiber (PCS1-7) | Transmission band: 400–1100 nm Numerical aperture: 0.22 Transmittance per meter: 0.9–0.99(400–1100 nm) |
| Lens | Focal length: 30.00 mm Diameter: 25.4 mm |
| CMOS | Pixel size: 6 μm × 6 μm Frame rate/resolution: 120 frame/s @640 pixel × 480 pixel Spectral responsivity: 390–1100 nm Shutter type: Global exposure Exposure time: 15.667–912.634 ms |

分别使用 PCS1-7 和 PCS1-50 光纤束对多通道光学成像单元的光学分离效果进行测试,得到了如图 2 所示的光斑图像,圆斑为光纤束所成的像。其中图 2(a)为采用 PCS1-7 得到的光斑图像,线框为每个通道的 ROI(Region of Interest),可以实现 7 束激光的独立测量,图 2(b)为采用 PCS1-50 得到的光斑,可以实现 50 束激光的独立测量。

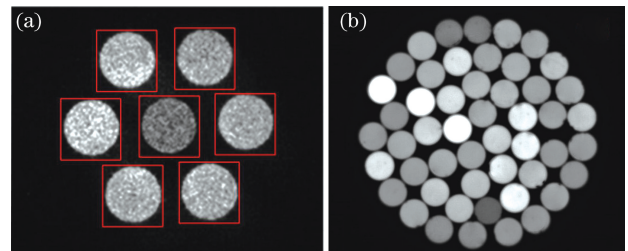


图 2 CMOS 感光面上激光光斑分布。(a) PCS1-7 的光斑图像;(b) PCS1-50 的光斑图像

Fig. 2 Laser spot distribution on CMOS surface, in which the round spot is the image of fiber bundle. (a) Spot image of the PCS1-7; (b) spot image of the PCS1-50

每个待测光源在各自光纤中传输,互不干扰,利用物像共轭关系使得光束通过消色差透镜后成像在 CMOS 感光面上的不同区域,实现了各个通道的光学分离。通过增加光纤束的芯数,可以实现探测通道数目的快速拓展。调整像距与物距还可以实现各

种尺寸 CMOS 与各种芯径光纤束的匹配。

2.2 单脉冲数据采集与处理单元

数据采集与处理单元对获取的光斑进行并行处理,同时获得多束待测激光脉冲能量。为实现激光单脉冲能量变化的在线监测以及激光状态的快速诊断,需要对每一个脉冲光产生的图像进行实时处理与显示。然而,单张图像本身就包含有大量的数据信息,对其进行处理需要一定的时间。

例如,对于重复频率为 30 Hz 的脉冲激光,对每一个激光脉冲产生的图像进行采集与处理,以分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 、存储位数为 8 bit 的图像为例,每秒需要实时处理 240 Mb 的图像数据,容易引起数据堆积。

为了提高单脉冲激光能量数据的实时处理效率,基于 LabVIEW 语言编写了数据采集与处理软件,流程如图 3 所示。

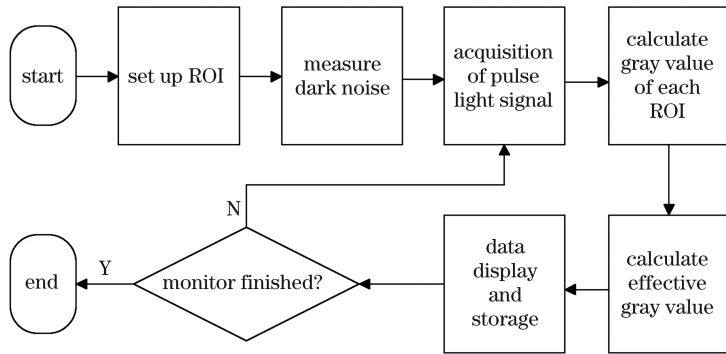


图 3 数据采集与处理程序流程图

Fig. 3 Flow chart of data acquisition and processing program

数据采集与处理流程如下:

1) 建立 ROI。建立 ROI,使得每一个 ROI 对应一个通道。对于 PCS1-7 光纤束,建立如图 2 (a) 中矩形框所示的 ROI,可实现 7 个通道的数据分离,每一个矩形框对应大小为 $90 \text{ pixel} \times 90 \text{ pixel}$,因此每一个通道对应的 CMOS 像素个数为 8100;对于图 2 (b) 中光纤束分布较密集的情形,可以通过创建圆形 ROI 来实现各个通道的数据分离。ROI 建立完成后,其位置不再更改。

2) 测量暗噪声。遮挡住光纤束输入端,采集暗噪声图像,提取各 ROI 内所有像元的灰度值并求和,作为暗噪声。每次使用该装置时,暗噪声只需要测量一次。

3) 采集脉冲光信号。脉冲激光器发送的触发信号触发 CMOS 图像传感器的全局快门,曝光 1 ms 后读取图像。曝光时间大于激光脉冲宽度,以确保整个激光脉冲都可以被测量得到。

4) 计算各通道灰度值。读取到的图像数据信息不再作为图像文件存储至计算机硬盘中,而是直接提取 7 个 ROI 中的像元灰度值,得到 7 个二维数组。

5) 计算有效灰度值。对 7 个二维数组求和并扣除暗噪声得到有效灰度值 G 。有效灰度值 G 可以用来表征脉冲激光能量 E 或激光功率 P 。

6) 存储与显示激光状态参数。对有效灰度值 G 进行处理获得各种激光状态参数;处理完的数据通过波形图表实时显示出来,并将其存储在计算机上。

7) 判断激光监测任务是否完成。若是,则关闭程序;若否,则返回 3)。

利用数据采集与处理单元对 CMOS 图像数据进行高效快速处理,实现了多通道单脉冲激光能量变化的实时处理、显示与存储。该方法不需要把原始图像数据存储到硬盘再进行读取与处理,故大大减小了数据处理量,提高了数据处理效率。

3 监测结果比较

多通道单脉冲激光能量变化监测装置,可以测量脉冲光的单脉冲能量,也可以测量连续光的功率。该装置采用 CMOS 上光斑的有效灰度值 G 来表征激光能量 E 或者激光功率 $P^{[17]}$,因此需要确定有效灰度值与激光能量或者激光功率的对应关系。采用激光功率计和多通道单脉冲激光能量变化监测装置同时测量一个激光器的激光功率,然后通过比较两者的测量结果来确定有效灰度值与激光功率或者激光能量的对应关系。

选用激光功率稳定性较好的 Matisse DS 环形腔染料激光器、可调中性密度片 (ND)、分束镜 (BS) 和激光功率计 (PM100D) 等搭建了如图 4 所示的比

较光路。其中, Matisse DS 环形腔染料激光器的输出波长为 589 nm 的连续激光, 功率稳定度优于 1%; 可调中性密度片用于调节激光功率, 其 OD (optical density) 值的调节范围从 OD1 到 OD3; 分束镜的分束比例固定为 1:99。

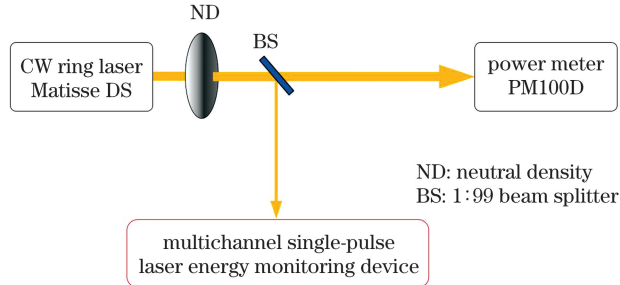


图 4 多通道单脉冲激光能量变化监测装置与功率计测量结果比较光路

Fig. 4 Light layout for comparison of measurement results between multichannel single-pulse laser energy change monitoring device and power meter

激光通过可调中性密度片 (ND) 后由分束镜 (BS) 分为两束, 其中 1% 的激光反射进入多通道单脉冲激光能量变化监测装置, 进行有效灰度值的测量; 99% 的激光透过分束镜进入激光功率计, 进行激光功率的测量。通过调节中性密度片的 OD 值, 改变进入两路探测设备的激光功率, 记录功率计和该装置各自的测量结果。为减小测量随机误差, 两路探测器均测量 5 min, 测量结果求取平均值。

测量得到的有效灰度值 G 与激光功率 P 的对应关系如图 5 所示。对有效灰度值 G 与激光功率 P 进行线性拟合, 线性相关系数达到 0.99。线性拟合关系如图 5 中实线所示, 拟合公式为

$$P = 3.2 \times 10^{-6} G - 0.03. \quad (1)$$

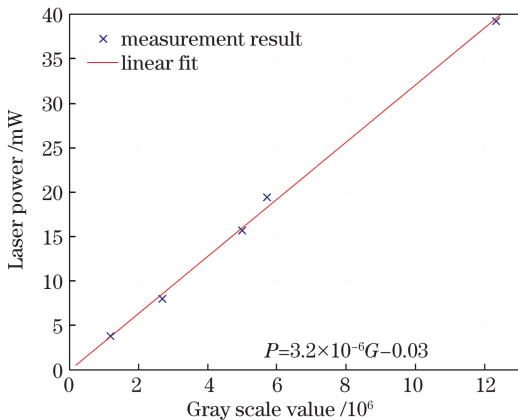


图 5 激光功率与灰度值之间的关系

Fig. 5 Relationship between laser power and gray scale value

因此可以看出, 本研究提出的多通道单脉冲激光能量变化监测装置的测量结果与激光功率计的测量结果呈现出良好的线性响应关系, 可用于激光功率变化的监测。测量出有效灰度值后, 根据 (1) 式即可计算得到激光功率。

需要指出的是, 由于 CMOS 图像传感器对不同波段的光谱响应不同, (1) 式中系数随波长变化而变化。因此, 类似于常用的激光功率计和激光能量计, 多通道单脉冲激光能量变化监测装置测量不同波段的激光功率或者激光能量时也需要进行光谱校正。对于只需要监测激光功率或者激光能量相对变化的应用场合, 则不需要进行校正, 有效灰度值的变化即可表示激光功率或者激光能量的相对变化。

4 四路激光脉冲能量变化同时监测

中国科学院精密测量科学与技术创新研究院研制的全高程全天时大气探测激光雷达可实现从近地面到 110 km 地球大气的探测^[18]。激光雷达系统如图 6 所示, 其中, Nd: YAG 激光器产生 1064 nm 的基频光, 其脉宽约为 10 ns, 重复频率为 30 Hz。基频光经过第一个倍频器 (SHG1) 倍频后产生 532 nm 激光, 用于低层和中层大气探测; 剩余基频光经过第二个倍频器 (SHG2) 倍频后产生第二束 532 nm 激光; 第二束 532 nm 激光抽运脉冲染料激光器 (NarrowScan PDL) 产生 589 nm 激光, 用于中层顶金属钠层探测。望远镜接收大气回波信号, 通过光纤耦合进入信号检测单元, 可以实现大气探测。

由于实验环境的变化、光学元器件的老化、染料浓度的变化等因素, 激光器的倍频效率、转换效率、自发辐射荧光 (ASE) 等状态参数可能会出现变化, 影响激光雷达的正常观测。将多通道单脉冲激光能量变化监测方法应用于激光雷达系统, 对 1064, 532, 589 nm 激光单脉冲能量以及 532 nm 激光抽运脉冲染料激光器产生的 ASE 的能量变化同时进行在线监测。

图 6 中 BS3、BS4、BS5 为透射率为 1%、发射为 99% 的分束镜, 用于实现 1064, 532, 589 nm 激光的取样; L1、L2、L3 和 L4 把 1064, 532, 589 nm 的取样激光以及 ASE 分别耦合到 PCS1-7 光纤束中的 4 路光纤, 进而输入至多通道单脉冲激光能量变化监测装置中。由于 ASE 在各个方向均有分布, 将 L4 放置在 ASE 能量分布的最强处。

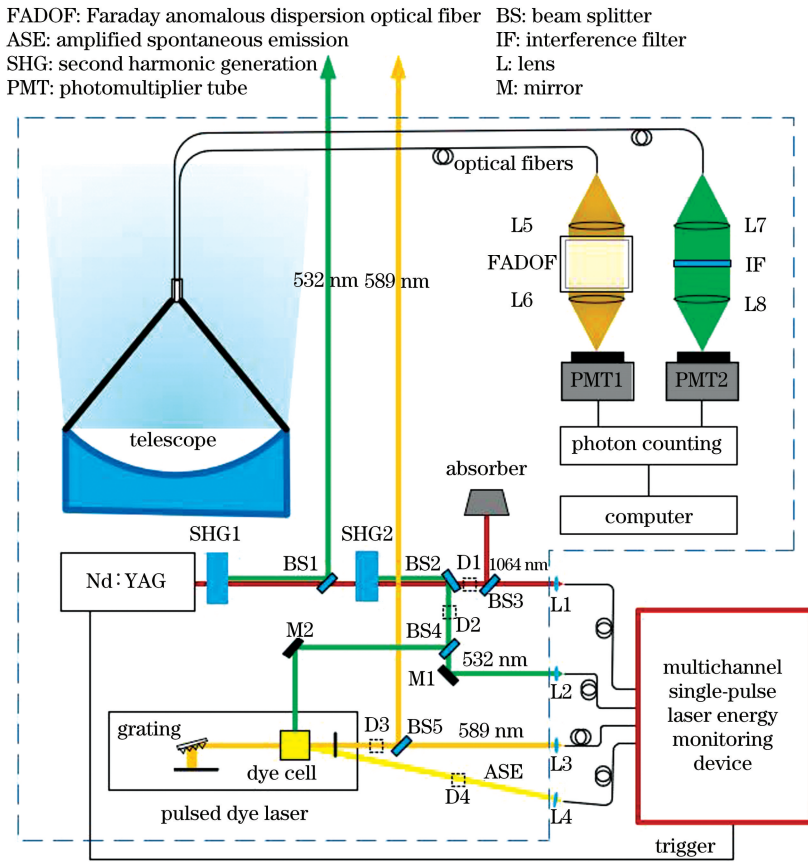


图 6 四路单脉冲激光能量变化同时监测光路

Fig. 6 Optical layout of the four channels single-pulse laser energy monitoring

Nd:YAG 激光器产生的触发信号同步触发 CMOS 图像传感器, 获取四路单脉冲激光光斑图像。通过数据采集与处理单元实时计算得到 1064, 532, 589 nm 激光以及 ASE 的单脉冲有效灰度值。不间断地测量脉冲激光器发射出的每一个脉冲, 实现了激光雷达激光状态的连续监测。实验过程中, 从 2020 年 1 月 18 日 23:54:13 到 2020 年 1 月 19 日 02:24:47, 激光器约产生 271040 个脉冲, 而 4 个通道均监测到 270001 个脉冲, 丢失了 1039 个脉冲。少数激光脉冲的丢失可能与 CMOS 图像传感器未能成功接收到触发信号有关。监测到的脉冲占总脉冲个数的 99.6%, 具有较高的监测效率。

为了得到实际的单脉冲激光能量, 在监测开始时刻, 用激光能量计在图 6 中 D1、D2、D3 和 D4 四个位置分别测量得到 1064 nm 单脉冲激光能量 $E_{(0)}^{1064}$ 为 670 mJ、532 nm 单脉冲激光能量 $E_{(0)}^{532}$ 为 312 mJ、589 nm 单脉冲激光能量 $E_{(0)}^{589}$ 为 30.5 mJ, ASE 能量 $E_{(0)}^{ASE}$ 为 3.2 mJ。根据激光能量计测量得到的能量大小, 对各通道有效灰度值分别进行标定, 得到 1064 nm 单脉冲激光能量 $E_{(t)}^{1064}$ 、532 nm 单脉

冲激光能量 $E_{(t)}^{532}$ 、589 nm 单脉冲激光能量 $E_{(t)}^{589}$ 以及 ASE 单脉冲能量 $E_{(t)}^{ASE}$ 随时间 t 的变化, 依次对应图 7(a) 中从上往下的 4 条曲线。从图 7(a) 可以看出在监测过程中 1064 nm 和 532 nm 的激光能量比较稳定, 而 589 nm 的激光单脉冲能量呈下降趋势, ASE 能量呈现上升趋势。

为了表征激光器的状态参数, 分别定义倍频晶体 (SHG2) 的倍频效率 η_{SHG2} 、脉冲染料激光器的效率 η_{PDL} 以及 ASE 比例系数 r_{ASE} , 表达式为

$$\eta_{SHG2} = \frac{E_{(t)}^{532}}{E_{(t)}^{1064} + E_{(t)}^{1064}}, \quad (2)$$

$$\eta_{PDL} = \frac{E_{(t)}^{589}}{E_{(t)}^{532}}, \quad (3)$$

$$r_{ASE} = \frac{E_{(t)}^{ASE}}{E_{(t)}^{532}}. \quad (4)$$

把激光能量计测量得到的激光能量值代入 (2)~(4) 式, 计算得到监测开始时刻倍频晶体 (SHG2) 的倍频效率、脉冲染料激光器的效率及 ASE 比例系数分别为 33.8%, 9.8%, 1.0%。

根据 (2)~(4) 式, 计算出激光器每一个脉冲状

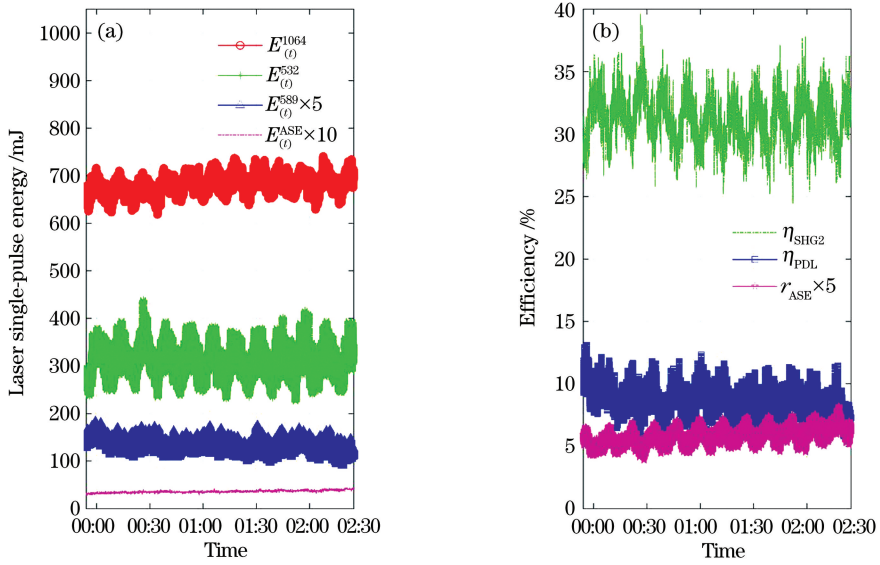


图 7 监测结果。(a)四路激光能量随时间的变化;(b)倍频晶体(SHG2)的倍频效率 η_{SHG2} 、脉冲染料激光器的转换效率以 η_{PDL} 及 ASE 的比例系数 r_{ASE}

Fig. 7 Monitoring results. (a) Four channels laser energy versus time;(b) efficiency of the secondary harmonic generation, conversion efficiency of pulsed dye laser, and ASE ratio versus time

态参数,如图 7 (b)所示,从上往下依次为倍频晶体(SHG2)的倍频效率 η_{SHG2} 、脉冲染料激光器的效率 η_{PDL} 以及 ASE 比例系数 r_{ASE} 。由图 7(b)可以计算得到监测过程中倍频晶体(SHG2)的平均倍频效率、脉冲染料激光器的平均效率以及 ASE 的平均比例系数分别为 31.2%、8.6%、1.2%。因此多通道单脉冲激光能量监测装置的监测结果与激光能量计的测量计算值较为吻合。从图 7(b)还可以看出,在监测过程中,倍频晶体(SHG2)的倍频效率和脉冲染料激光器的效率整体呈下降趋势,而 ASE 所占比例整体呈上升趋势。

监测结果说明激光的输出功率、倍频效率、泵浦效率可能会随时间发生变化,有必要进行激光能量的监测与控制。多通道单脉冲激光能量变化监测装置可以测量得到脉冲激光器的每一个脉冲激光能量,从而实现激光状态参数的不间断监测。在本文基础上,未来还将开展其他方面的工作,例如对激光脉冲能量测量的误差进行标定;通过增加法布里博罗标准具等激光频率鉴别器件来实现对激光频率的稳定测量。

5 结 论

提出了一种多通道激光单脉冲能量变化监测方法,并使用该方法对全高程全天时大气探测激光雷达中四路激光的单脉冲能量变化进行了监测。结果

表明,该方法能够高效地实现多路激光单脉冲能量变化的同时在线监测,在长时间的监测过程中脉冲遗漏率极低。该方法还可拓展应用于连续光以及其他类型光源中多路激光能量变化的同时在线监测,具有极大的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] Yang Y L, Yang Y, Xia Y, et al. Solid-state 589 nm seed laser based on Raman fiber amplifier for sodium wind/temperature lidar in Tibet, China [J]. Optics Express, 2018, 26(13): 16226-16235.
- [2] Li L P, Li Y J, Song Y J, et al. High-power and high-efficiency widely tunable Ti : sapphire nanosecond pulsed laser pumped by Q-switched green laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508018.
李隆普, 李玉娇, 宋艳洁, 等. 高功率、高效率调 Q 绿光抽运的钛宝石宽调谐纳秒脉冲激光 [J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508018.
- [3] Lian Y X, Wang C, Wang D, et al. Electro-optic Q-switched Nd : YAG laser with short pulse interval and pulse group output [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0601001.
连亚霄, 王超, 王颀, 等. 短脉冲间隔脉冲组输出电光调 Q Nd : YAG 激光器 [J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0601001.
- [4] Bai L L, Wen X, Yang Y L, et al. 397.5 nm ultraviolet laser power stabilization based on feedback

- control via acousto-optic frequency shifter [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 1001008.
- 白乐乐, 温馨, 杨煜林, 等. 基于声光频移器反馈控制的 397.5 nm 紫外激光功率稳定研究[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1001008.
- [5] Zhu Y, Xu B, Fei S, et al. Study on data quality control method of aerosol lidar data[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2018, 38(5): 692-698.
- 朱毅, 许波, 费松, 等. 激光雷达数据质量控制研究[J]. 气象科学, 2018, 38(5): 692-698.
- [6] Du Y, Hua D X, Xin W H, et al. Emission energy monitoring of atmospheric detection lidar[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2018, 35(2): 209-215.
- 杜洋, 华灯鑫, 辛文辉, 等. 大气探测激光雷达发射能量监测[J]. 量子电子学报, 2018, 35(2): 209-215.
- [7] Gao Y H, Zhang Y G, Huang M S, et al. Realization of fast response circuit for pyroelectric detector[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2003, 25(4): 333-335, 340.
- 高月华, 张亦工, 黄民双, 等. 热释电探测器快速响应的电路实现[J]. 压电与声光, 2003, 25(4): 333-335, 340.
- [8] Li W J, Zhao D L, Lin Y, et al. Design of highly sensitive on-line detecting system for ultraviolet pulse lasers energy [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(12): 1222002.
- 李文洁, 赵读亮, 林颖, 等. 高灵敏紫外激光脉冲能量在线检测系统设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(12): 1222002.
- [9] Liang X, You L B, Yu Y S. Excimer laser pulse energy detection under pulse repetition running mode [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2010, 27(3): 281-287.
- 梁勋, 游利兵, 余吟山. 重复率激光的单个脉冲能量检测技术[J]. 量子电子学报, 2010, 27(3): 281-287.
- [10] Wang B H, Song S L, Gong W, et al. Optimization decomposition method of full-waveform LiDAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(11): 1859-1867.
- 王滨辉, 宋沙磊, 龚威, 等. 全波形激光雷达的波形优化分解算法[J]. 测绘学报, 2017, 46(11): 1859-1867.
- [11] Xie C K, Chen M, Yang B X, et al. Development and performance testing of pulsed excimer laser energy detector[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0102006.
- 谢承科, 陈明, 杨宝喜, 等. 准分子激光脉冲能量探测器的设计与性能测试[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102006.
- [12] Fimpel P, Riek C, Ebner L, et al. Boxcar detection for high-frequency modulation in stimulated Raman scattering microscopy[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(16): 161101.
- [13] Hu Y, Wang D H, Zhao X Q. Study of online parameter measurement technique of multiple laser pulses based on time-sequence method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 1002005.
- 胡云, 王大辉, 赵学庆. 多路脉冲激光参数分时法在线测试技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1002005.
- [14] Zhang Y M, Sheng K, Li J P. Study on multi-channel detection for pulse laser[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(4): 417-420, 426.
- 张彦梅, 盛珂, 李建平. 多通道脉冲激光探测技术研究[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(4): 417-420, 426.
- [15] Xia Y, Cheng X W, Li F Q, et al. Long-term wavelength drift compensation of tunable pulsed dye laser for sodium detection lidar [J]. Optics Communications, 2015, 354: 52-58.
- [16] Yan WB, Yang Y, Cheng X W, et al. A multi-channel and multi-type laser power monitoring device and method: CN202010013332.9[P]. 2020-05-22.
- 闫文兵, 杨勇, 程学武, 等. 一种多通道多类型激光功率同时监测的装置及方法: CN202010013332.9 [P]. 2020-05-22.
- [17] Yi Q, Li C, Yang J C, et al. Research on measuring energy of laser's near-field spot by CCD photograph law[J]. Optoelectronic Technology, 2018, 38(4): 282-285.
- 易琰, 李晨, 杨建昌, 等. CCD 摄像法测量激光近场光斑能量的研究[J]. 光电子技术, 2018, 38(4): 282-285.
- [18] Cheng X W, Song J, Li F Q, et al. Dual-wavelength high altitude detecting lidar technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(5): 601-606.
- 程学武, 宋娟, 李发泉, 等. 双波长高空探测激光雷达技术[J]. 中国激光, 2006, 33(5): 601-606.