

多普勒激光雷达中种子激光注入的一种鉴别方法

高 健^{1,2}, 周安然^{1,2}, 孙东松^{1,2}, 郑 俊^{1,2}, 李梓霖^{1,2}, 韩於利^{1,2}

(1. 中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学院近地空间环境重点实验室, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 多普勒测风激光雷达以其高分辨率、高精度、大探测范围、能提供三维风场信息的能力,吸引了多国学者的关注,并投入了大量的人力、物力进行研究。所研究的多普勒测风激光雷达采用种子注入的方式获得单纵模、窄线宽、高功率的激光输出。激光器中心频率的缓慢漂移、环境噪音、激光棒温度变化或者振动干扰都有可能导激光种子光的注入不成功,出射激光光谱由注入成功时的单纵模输出变为多纵模输出。激光单纵模输出时线宽约为 200 MHz,而多纵模时激光线宽很宽。而种子注入不成功时所出射的多纵模激光脉冲将导致瑞利后向散射谱变宽,会增加风速测量误差。该脉冲筛选电路在数据采集环节实现对多纵模激光脉冲的筛选,有效降低了风速测量误差,提高测风准确度。

关键词: 遥感; 激光雷达; 多普勒测风; 脉冲筛选电路

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0230001

An identification method of seed laser injection in Doppler lidar

Gao Jian^{1,2}, Zhou Anran^{1,2}, Sun Dongsong^{1,2}, Zheng Jun^{1,2}, Li Zimu^{1,2}, Han Yuli^{1,2}

(1. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Key Laboratory of Geospace Environment, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China)

Abstract: Doppler wind lidar with its high resolution, high precision, large detection range, the ability to provide three-dimensional wind field information, has attracted the attention of multinational scholars, and put a lot of manpower and material resources to carry out research. The Doppler wind lidar was designed to obtain single longitudinal mode, narrow linewidth and high power laser output by seed injection. The slow drift of the center frequency of the laser, ambient noise, laser rod temperature change or the vibration disturbance may cause the failure of seed injection. Then the laser spectrum was transformed from a single longitudinal mode output to a multiple longitudinal mode output. The linewidth of single longitudinal mode laser output was about 200 MHz. However, the multi-longitudinal mode laser output had a wide linewidth, which led to widened Rayleigh backscattering spectrum and then great speed errors in the speed inversion condition. The pulse screening circuit was developed to filter the multi longitudinal mode pulse during the data acquisition, which can effectively reduce the error of wind speed inversion and improve the precision of wind speed measurement.

Key words: remote sensing; lidar; Doppler winds; pulse screening circuit

收稿日期:2017-08-05; 修订日期:2017-10-01

基金项目:国家自然科学基金(41227804,41374156)

作者简介:高健(1989-),男,硕士生,主要从事测风激光雷达及光电探测方面的研究。Email:gaoj1220@126.com

导师简介:孙东松(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事光电探测,激光雷达遥感等方面的研究。Email:sds@ustc.edu.cn

0 引言

全球风场的主动观测被世界气象组织称为最具意义和挑战性的气象观测之一^[1]。精确的大气风场观测对提高长期天气预报的准确性、风暴预报的准确性、改进气候研究模型、军事环境预报、预报可能的生化武器释放环境以提高国防安全等方面具有重大意义^[2-5]。

激光器提供的激光脉冲质量直接关系到多普勒激光雷达的频率检测的精度，一般要求激光脉冲频率为稳频单纵模，通常采用种子注入式调 Q 脉冲激光器。在欧空局星载的测风激光雷达系统计划中设计了独立的种子激光器稳频控制系统，在此基础上使用了扫描激光频率进行反馈的方法，激光频率漂移控制效果好^[6]。中国科学技术大学激光雷达课题组研制的 40 km 车载多普勒测风激光雷达^[7]和 60 km 车载多普勒测温测风激光雷达^[8]通过建立三级温度控制系统实现稳频^[9-11]。将种子激光器置于调控精度为 0.001 °C 恒温箱内来减小种子激光器中心频率的漂移，从而降低测风误差。

种子注入适用于这样一个过程，在 Q 开关打开期间，通过注入一个非常窄线宽的激光到脉冲激光腔体中从而获得工作在单模的脉冲激光。为了种子注入正确的工作，种子激光发射要比呈现在脉冲激光腔体内的任何自发噪声发射要强几个数量级。当种子激光的发射频率在脉冲激光谐振腔模式的带宽内时，Q 脉冲在这个频率的建立时间将比在由背景随机噪声发射产生的频率建立的时间要更迅速。因此，从种子信号建立的脉冲将会充满增益介质，同时任何可能由噪声发射所产生的脉冲之前提取出和种子激光相同频率的激光能量。这个本质上是抑制任何由噪声发射所产生的脉冲的放大和增长。用这种方式，所有被存储在同样放大增益单元中(如 Nd:YAG)的能量，被种子建立的脉冲所耗尽，从而产生单频率的输出脉冲。

种子激光是连续、窄线宽、单模激光器，种子激光需要完全注入到调 Q 脉冲激光器，才能产生稳频、单纵模、调 Q 脉冲激光输出。在种子激光注入前，激光处于多纵模多频率输出状态，这时调 Q 脉冲建立时间较长。种子激光成功注入后，调 Q 激光

脉冲建立时间迅速，或调 Q 激光脉冲建立时间延时减小，通过检测该时间延时的变化可以判断种子注入的情况。

1 激光频率稳定性对多普勒检测的影响

大气后向散射是一种包含了布里渊散射和瑞利散射的复杂散射，由于文中关注的是 15 km 以上大气风场测量，而这个高度气溶胶含量已经很低，可以忽略，故激光大气后向散射谱可简化为瑞利光谱，用一个高斯函数来表示：

$$I(\nu) = \sqrt{4\ln 2 / \pi \Delta \nu_R^2} \exp(-4\ln 2 \nu^2 / \Delta \nu_R^2) \quad (1)$$

式中： $\Delta \nu_R$ 为激光瑞利后向散射谱的半高全宽，可由下式给出：

$$\Delta \nu_R = \sqrt{(\delta \nu_{\text{Ray}}(T))^2 + (\delta \nu_{\text{Laser}})^2} \quad (2)$$

式中： $\delta \nu_{\text{Laser}}$ 为出射激光的线宽； $\delta \nu_{\text{Ray}}(T)$ 为由于分子热运动而产生散射的瑞利谱宽，其形式如下：

$$\delta \nu_{\text{Ray}}(T) = \nu_0 \sqrt{(32kT \ln 2 / mc^2)} \quad (3)$$

式中： ν_0 为出射激光脉冲的中心频率； k 为玻尔兹曼常量； T 为大气温度； m 为空气分子质量； c 为光在真空中传播速度。

同样的，中心频率为 ν_0 的单纵模激光器的光谱分布也可以用一个高斯函数来表示：

$$L(\nu - \nu_0) = \sqrt{4\ln 2 / \pi \delta \nu_{\text{Laser}}^2} \exp(-4\ln 2 (\nu - \nu_0)^2 / \delta \nu_{\text{Laser}}^2) \quad (4)$$

大气分子的后向散射光谱应为出射激光光谱和瑞利散射光谱的卷积，如下式所示：

$$I_R(\nu) = I(\nu) \otimes L(\nu - \nu_0) \quad (5)$$

当种子未能成功注入激光器时，激光器的出射激光脉冲为多纵模模式，可认为其光谱成分是由中心频率不同的多个单纵模叠加而成，如下式所示：

$$I(\nu) = \sum_{k=1}^n A_k L(\nu - \nu_k) \quad (6)$$

式中： A_k 为中心频率为 ν_0 的单纵模谱线的增益系数。

此时，对应的大气分子后向散射光谱为多个纵模分别与瑞利散射光谱卷积后求和：

$$I_R(\nu) = \sum_{k=1}^n I(\nu) \otimes A_k L(\nu - \nu_k) \quad (7)$$

种子光成功注入激光器时，激光脉冲为单纵模输出，出射激光脉冲的中心波长为 355 nm，出射激光的线宽为 200 MHz，假设大气温度为 216.6 K(15 km

高度),由公式(2)和公式(3)可知激光瑞利后向散射谱的半高宽为 3.4GHz,如图 1 曲线 a 所示。种子未成功注入激光器时,激光脉冲为多纵模输出,此时激光线宽很宽,这里为了方便说明所研制的脉冲筛选电路能够减小由于种子注入不成功而导致的风速误差,假设种子注入不成功时的出射激光线宽为 30 GHz (但不仅限于 30 GHz),按照公式(2)、(3)计算出此时激光瑞利后向散射谱的半高宽达到 30.2 GHz,如图 1 曲线 b 所示。

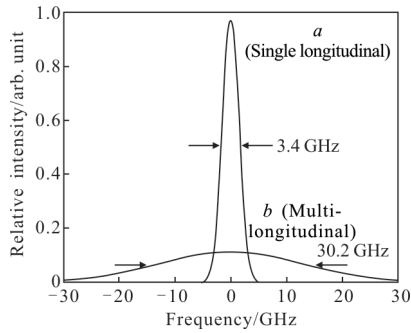


图 1 单纵模和多纵模时激光瑞利后向散射谱

Fig.1 Laser Rayleigh backscattering spectra of the single longitudinal mode and the multi-longitudinal mode

Nd:YAG增益曲线的半高宽大约为 120 GHz,这说明 Nd:YAG 能够产生大量的纵向模式。然而,由于模式竞争,离增益曲线中心位置频率最近的纵向模式将会吸收大多数的有效能,而消耗掉较远的其他纵向模式。这样就有了如图 2 所示的激光器未注入种子时的模式间隔 $\Delta\nu$ 为 250MHz 的正态分布图。由于种子注入后的出射激光线宽 200 MHz,其线宽内只会覆盖一种模式,因此说明激光器为单纵模输出。

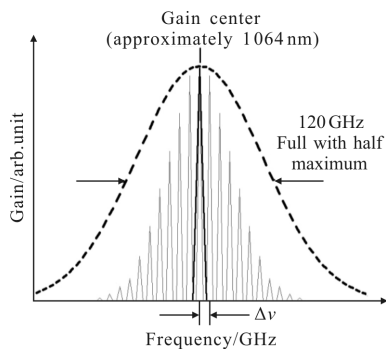


图 2 激光器纵模分布

Fig.2 Laser longitudinal mode distribution

图 3 为单纵模激光脉冲的大气瑞利后向散射光

谱与双边缘鉴频器光谱的相对关系。其中大气瑞利后向散射谱中实线表示无多普勒平移时的光谱,虚线表示有多普勒平移时的光谱。两边曲线为 Fabry-Perot 的两信号通道的透过率曲线,其分布可由下式给出:

$$H(\nu) = B + T_{pe} \left(\frac{1-R_e}{1+R_e} \right) \times \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} R_e \cos \left(\frac{2\pi n(\nu-\nu_c)}{\Delta\nu_{FSR}} \cdot \frac{1+\cos\theta_0}{2} \right) \times \text{sinc} \left(\frac{2n\nu_0}{\Delta\nu_{FSR}} \cdot \frac{1-\cos\theta_0}{2} \right) \right\} \quad (8)$$

式中: B 为背景常数; T_{pe} 为透过率曲线的峰值; R_e 为有效反射率; $\Delta\nu_{FSR}$ 为 Fabry-Perot 是标准具的自由谱间距 (Free Spectral Range, FSR); θ_0 为入射到标准具表面的光束发散半角; ν_c 为透过率曲线的中心频率。

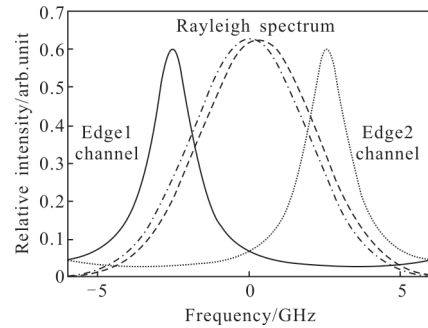


图 3 单纵模激光大气瑞利后向散射光谱与双边缘鉴频器光谱分布

Fig.3 Single longitudinal mode laser atmospheric Rayleigh backscattering spectrum and spectral distribution of double edge discriminator

大气回波信号通过边缘鉴频器的透过率曲线可以写成:

$$T(\nu) = H(\nu) \otimes I_R(\nu) \quad (9)$$

定义频率响应函数如下:

$$R(\Delta\nu, T) = \frac{T_1(\Delta\nu, T) - T_2(\Delta\nu, T)}{T_1(\Delta\nu, T) + T_2(\Delta\nu, T)} \quad (10)$$

式中: $R(\Delta\nu, T)$ 为多普勒频移 $\Delta\nu$ 的函数; T_1 和 T_2 表示大气回波信号通过两个边缘鉴频器上表现的透过率值。根据理论计算得到 T_1 和 T_2 从而得到 R 值的表达式,为频率的单调函数。而多普勒频移 $\Delta\nu$ 与径向风速 V_r 的关系为 $\Delta\nu = 2V_r \cdot \nu_0 / c$, 因此 R 值也为径向风速 V_r 的单调函数。

公式(5)描述了种子注入成功时所产生的单纵模激光脉冲的大气分子后向散射光谱,公式(7)描述了

种子未成功注入时所产生的多纵模激光脉冲的大气分子后向散射光谱。结合公式(9)、(10)表达式,可理论上分别计算出种子成功注入与未成功注入时 R 值与风速的关系,如图 4 所示。若定义系统风速灵敏度为 R/V , 则种子成功注入时的系统风速灵敏度为 $3.1 \times 10^{-3}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$, 种子未成功注入时的系统风速灵敏度为 $-6.5 \times 10^{-5}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$, 实际的系统风速灵敏度为:

$$R/V = a \times 3.1 \times 10^{-3}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) + b \times [-6.5 \times 10^{-5}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})] \quad (11)$$

式中: a 为成功注入的脉冲比例; b 为未成功注入的脉冲比例。

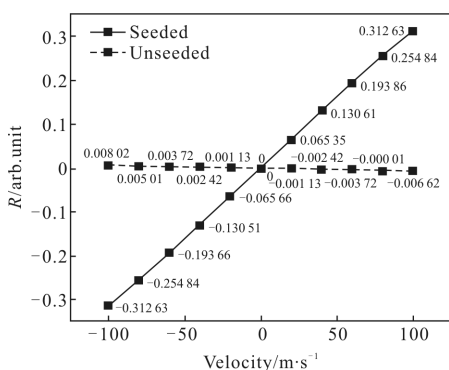


图 4 种子成功注入与种子未注入时的 R 值曲线

Fig.4 R value of the seed was successfully injected and the seed was not injected

若假设有 3% 的激光脉冲为种子未成功注入的脉冲,那么由公式(11)可知实际的系统风速灵敏度为 $R/V=0.003\ 005\ 05$ 。那么在在风速 $100\ \text{m/s}$ 时,由于种子未成功注入而导致的风速误差为 $\Delta V=3.06\ \text{m/s}$ 。

2 单纵模稳频激光脉冲检测方法

设计的脉冲筛选电路有两路输入,分别为 Q 开关触发信号输入和光电探测器的光电脉冲信号输入。其中 Q 开关同步触发信号的脉宽为 $1\ \mu\text{s}$ 左右,脉冲电平大于 $2.5\ \text{V}$ 的矩形脉冲。此路信号输入到比较电路中的多谐振荡器从而实现了对 Q 开关触发信号的脉宽调制。所设计电路通过电路板上可调电位器可将 Q 开关触发信号调制成 $0\sim 1\ 000\ \text{ns}$ 脉宽的 TTL 电平信号。光电探测器所输入的信号为 Q 脉冲经光电转换后的电脉冲信号,信号脉宽 $10\ \text{ns}$ 左右,峰值在 $1\sim 2\ \text{V}$ 可调。脉冲筛选电路的输出是脉宽为 $463\ \text{ns}$ 的 TTL 电平矩形脉冲信号,作为门控的输入触发,门控收到脉冲筛选电路的输出信号后才会触

发采集卡和 PMT(光电倍增管)工作。如图 5 所示。

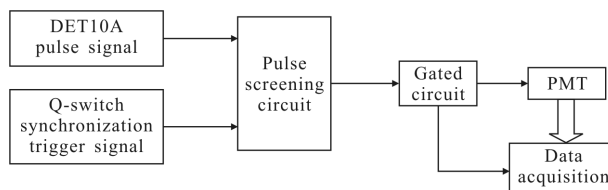


图 5 脉冲筛选电路原理结构图

Fig.5 Structure diagram of pulse screening circuit

如图 6 所示,DET10A 输入的是光电探测器所探测到的 Q 脉冲激光信号,信号是高斯分布,经过比较器后,将高斯分布的脉冲信号转换成矩形脉冲信号 $A2$ 。

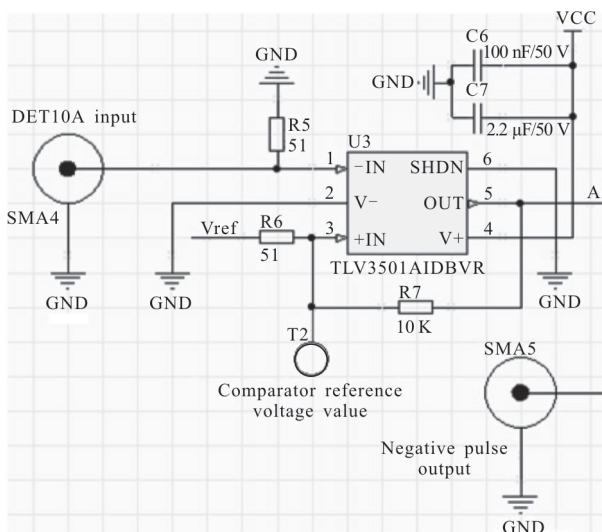


图 6 脉冲筛选电路

Fig.6 Pulse screening circuit

如图 7 所示,当 $A2$ 信号的上升沿落在 $B2$ 信号的高电平区间内时, $Q2$ 输出脉冲,输出的脉冲作为门控的触发从而触发采集卡采集数据。反之, $A2$ 信号的上升沿落在 $B2$ 信号的低电平时,则不输出脉冲。由于种子注入效果会导致脉冲建立时间不同,通过调节 $B2$ 信号的门限宽度,使种子注入成功的脉冲都落在门限内,而种子注入不成功的脉冲落在门限之外,从而有效筛选出成功注入种子的激光脉冲。整个脉冲筛选电路的工作时序如图 8 所示。

使用泰克公司的 AFG3252 双通道信号发生器测试电路板的脉冲漏检概率。其中 1 通道设置成脉宽 $1\ 000\ \text{ns}$,幅值 $3\ \text{V}$,重频 $1\ \text{kHz}$ 的矩形脉冲信号,用来模拟 Q 开关同步触发信号。2 通道设置成脉宽

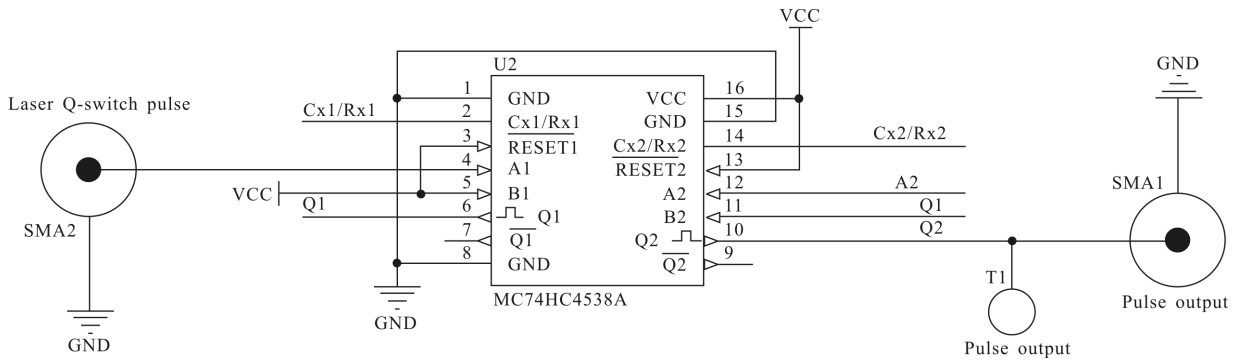
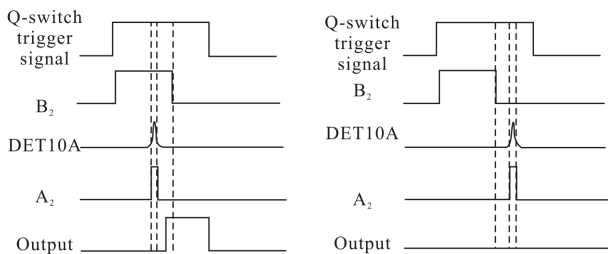


图 7 脉冲筛选电路

Fig.7 Pulse screening circuit



(a) 种子成功注入时脉冲筛选电路的工作时序图
(a) Pulse timing circuit of seeded
(b) 种子未成功注入时脉冲筛选电路的工作时序图
(b) Pulse timing circuit of unseeded

图 8 脉冲筛选电路工作时序图

Fig.8 Pulse timing circuit

200 ns, 幅值 1.5 V, 重频 1 kHz 的矩形脉冲信号, 用

来模拟 DET10A 脉冲信号。同时把 2 通道相对于 1 通道的上升沿延时设为正 200 ns, 将脉冲筛选电路板的可调脉宽调制成 400 ns 后进行 15 min 统计, 统计结果为脉冲筛选电路板的输入脉冲数为 900 000, 输出脉冲数为 900 000。再将脉冲筛选电路板的可调脉宽 100 ns 进行 15 min 统计, 统计结果为输入脉冲数为 900 000, 输出脉冲数为 0。由此说明所研制电路板的漏检概率为 0。

3 脉冲检测实验及其分析

用研制的电路板结合三台激光器(两台Continuum公司的灯泵浦 Nd:YAG 激光器以及一台 InnoLas 公司的半导体泵浦 Nd:YAG 激光器)进行实验。图 9 为

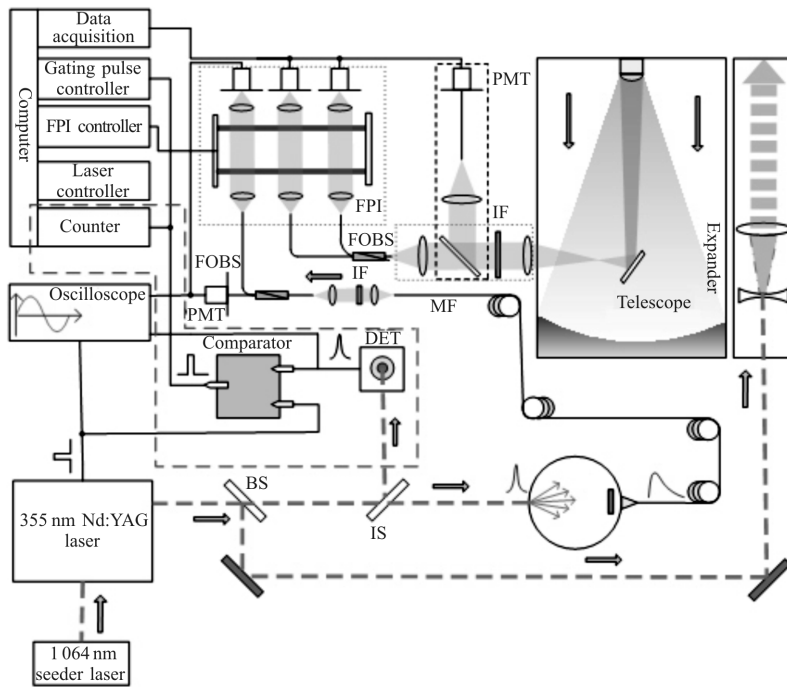


图 9 多普勒测风激光雷达系统结构图

Fig.9 Structure of Doppler wind lidar system

40 km 低平流层多普勒测风激光雷达系统结构图,整体包括了四个子系统:激光发射系统,望远镜接收系统,接收系统和数据采集与处理系统。种子注入的 Nd:YAG 激光的三倍频输出波长为 355 nm,大部分光经反射镜后进入扩束器出射进入大气,一小部分进入了积分球和 DET10A 光电探测器。DET10A 的光电脉冲信号送入脉冲筛选电路板进行甄别,判断是否为种子注入成功的脉冲,若注入则电路板输出脉冲触发门控工作,若没注入则不输出脉冲,门控卡不工作。同时计数卡对电路板输出脉冲个数进行统计,从而获得种子注入与未注入脉冲的个数。计数卡的软件界面如图 10 所示。计数卡与计算机通过串口进行通信,软件可对串口号和串口波特率进行配置。有效脉冲数为电路板输出脉冲个数,总脉冲数为 Q 开关触发脉冲个数,即激光器输出脉冲个数。开始和暂停控件是用来控制软件界面的计数开始和暂停,方便脉冲个数统计。



图 10 计数卡软件界面

Fig.10 Software interface of the count card

图 11 为示波器采集到的脉冲筛选电路板的工作波形图。通道 1 是 Q 开关触发信号;通道 2 是 DET10A 信号;通道 3 是脉冲筛选电路板输出信号;通道 4 是门限信号。

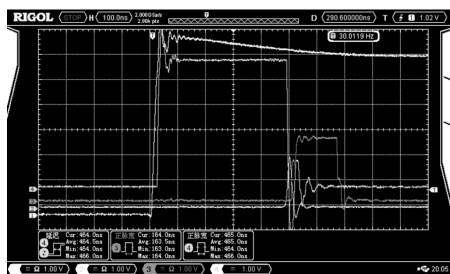


图 11 脉冲筛选电路板各信号通道波形

Fig.11 Waveform of the pulse screening circuit

实验使用的三台激光器分别为重频 30 Hz 的 Continuum 9030 激光器,编号为 1;重频 50 Hz 的 Continuum 9050 激光器,编号为 2;重频 100 Hz 的

InnoLas Spotlight 2000 激光器,编号为 3。种子完全注入时的脉冲相对与完全未注入时脉冲的提前量分别为:编号为 1 的激光器单脉冲能量 45 mJ 条件下为 38 ns,编号为 2 的激光器单脉冲能量 330 mJ 条件下为 10 ns,编号为 3 的激光器单脉冲能量 210 mJ 条件下为 6 ns。定义 $\Delta t=0$ 为激光输出脉冲相对种子完全注入时的激光脉冲的延时为 0。 $\Delta t=\tau$ 表示设定的门限宽度使激光输出脉冲延时大于 τ 的脉冲被剔除,体现为激光输出脉冲延时大于 τ 时电路板无输出。图 12 所示为三台激光器在不同 Δt 时的电路板输出脉冲与激光输出总脉冲的比例,每个 Δt 统计时长约 1 h。

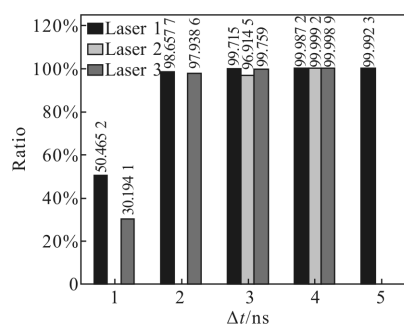


图 12 三台激光器不同 Δt 时的输出脉冲比例

Fig.12 Ratio of the output pulses when the three lasers are in different Δt

由于激光器脉冲线型本身有 1.5 ns 左右的抖动,不同激光器其抖动范围有所区别,若 Δt 阈值设置过小,将会把脉冲本身的抖动所导致的脉冲偏移也当做未注入的脉冲被剔除掉,这会导致采集到的数据丢失部分有效数据。因此,将 Δt 阈值设为 3 ns 时,在剔除种子未成功注入的脉冲的同时不至于丢失有效脉冲。

$\Delta t=3$ ns 时,三台激光器的种子注入成功的脉冲比例分别为 99.715 0%,96.914 5%,99.759 0%;未成功注入的比例分别为 0.285 0%,3.085 5%,0.241 0%。这说明所研制的脉冲筛选电路能够有效剔除种子注入不成功的脉冲。

4 结 论

直接探测多普勒测风激光雷达采用种子注入式调 Q 脉冲激光器来获得窄线宽稳频的单纵模激光脉冲。文中从激光器频率稳定性对多普勒检测的影响方面进行分析,讨论了种子成功注入与未成功注入

的情况下激光脉冲的频谱特性以及对风速测量的误差影响。从种子注入与否激光脉冲呈现出的时域特性出发,研制了脉冲筛选电路,用来剔除种子注入不成功的激光脉冲,从而减小风速误差。通过三台激光器的实验验证,将 Δt 阈值设为 3 ns,对每台激光器进行连续 1 h 的脉冲计数统计,所研制的脉冲筛选电路能够有效剔除种子注入不成功的脉冲比例分别为 0.285 0%,3.085 5%,0.241 0%。

参考文献:

[1] World Meteorological Organization. Preliminary statement of guidance regarding how well satellite capabilities meet WMO user requirements in several application areas. WMO Satellite Reports SAT-21[R]. WMO/TD, No.913.1998.

[2] Zhang Xiaowen, Zheng Yongguang, Wu Lei, et al. Review on application of wind profiler Radar in weather monitoring and forecasting [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2017, 45(2): 20150464.(in Chinese)
张小雯, 郑永光, 吴蕾, 等. 风廓线雷达资料在天气业务中的应用现状与展望[J]. 气象科技, 2017, 45(2): 20150464.

[3] Sun Dongsong, Zhong Zhiqing, Chi Ruli, et al. Performance and analysis of 1.06 μm direct detection wind lidar[J]. *Laser and Infrared*, 2004, 34(6): 412-415. (in Chinese)
孙东松, 钟志庆, 迟如利, 等. 1.06 μm 直接接收为散射测风激光雷达的性能分析[J]. 激光与红外, 2004, 34(6): 412-415.

[4] Sun Dongsong, Zhong Zhiqing, Wang Bangxin, et al. Direct detection Doppler wind lidar based on dual FP etalon [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, 23(3): 303-306. (in Chinese)
孙东松, 钟志庆, 王邦新, 等. 基于 FP 标准具的直接探测多普勒测风激光雷达[J]. 量子电子学报, 2006, 23(3): 303-306.

[5] Wang Wenlong. Atmospheric wind field modeling and its application [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)

王文龙. 大气风场模型研究及应用[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.

[6] Zhang F, Dou X, Sun D, et al. Analysis on error of laser frequency locking for fiber optical receiver in direct detection wind lidar based on Fabry -Perot interferometer and improvements [J]. *Opt Eng*, 2014, 53(12): 124102.

[7] Zhang Feifei, Wang Guocheng, Sun Dongsong, et al. Research on the radial velocity bias in Doppler wind lidar based on Fabry-Perot interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0814002. (in Chinese)
张飞飞, 王国成, 孙东松, 等. 基于法布里-珀罗干涉仪多普勒测风激光雷达径向风速漂移研究[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0814002.

[8] Han Yan, Sun Dongsong, Weng Ningquan, et al. Development of 60 km mobile Rayleigh wind lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1414-1419. (in Chinese)
韩燕, 孙东松, 翁宁泉, 等. 60 km 车载瑞利测风激光雷达研制[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1414-1419.

[9] Zhang Feifei. Research on Doppler wind lidar system with wind detection of high temporal and spatial resolution [D]. Hefei: University of Science & Technology of China, 2015: 103-109. (in Chinese)
张飞飞. 高时空分辨率多普勒测风激光雷达系统研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015: 103-109.

[10] Han Yuli. Development for middle atmospheric temperature and wind lidar for gravity wave observation [D]. Hefei: University of Science & Technology of China, 2016: 31-66. (in Chinese)
韩於利. 中高层大气测温测风激光雷达研制及重力波观测[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016: 31-66.

[11] Zheng Jun, Sun Dongsong, Dou Xiankang, et al. 60 km Rayleigh Doppler lidar and wind measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1030002. (in Chinese)
郑俊, 孙东松, 窦贤康, 等. 60 km 瑞利多普勒激光雷达及其风场探测[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1030002.