

铁共振荧光多普勒激光雷达光源的频率稳定性研究

李 乘^{1,2}, 吴德成^{1,3}, 刘 爽⁴, 邓 迁^{1,3}, 秘国江⁴, 王邦新^{1,3}, 王珍珠^{1,3}, 刘 东^{1,3}, 王英俊^{1,3}

1. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230026;
3. 先进激光技术安徽省实验室, 安徽合肥 230026;
4. 华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要: 种子注入的 372 nm 稳频 Nd:YAG 激光器作为铁共振荧光多普勒激光雷达的激光光源, 其性能将直接影响大气温度和径向风速的测量精度, 属于研制难度较大但极其重要的关键技术。文中对激光光源的频率稳定性进行了仿真分析和实验研究。利用蒙特卡洛方法, 仿真了振荡级输出 1116 nm 脉冲光的频率稳定性(均方根)应小于 1 MHz; 对改进型 Ramp-Fire 种子注入技术进行了详细介绍, 并在振荡级光路中采用了该技术; 通过激光拍频实验, 测量得出 1116 nm 脉冲光在 10 min 内的频率稳定性的均方根为 543.24 kHz, 其结果满足指标要求, 可将频率抖动和频率漂移引起的系统误差减少至 0.51 K 和 0.61 m/s。文中所做工作为铁共振荧光多普勒激光雷达实现大气温度和径向风速的高精度测量提供了必要保障。

关键词: 铁共振荧光多普勒激光雷达; 频率稳定性; 蒙特卡洛方法; 种子注入技术; 激光拍频
中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230025

0 引言

温度和风场是表征大气状态的重要环境参量。在中间层顶部到热层底部(Upper Mesosphere and Lower Thermosphere, UMLT)区域, 约 75~115 km 高度区间, 由于缺乏有效的观测手段, 在该高度范围内的温度和风场垂直分布观测数据相对匮乏^[1]。激光雷达利用 UMLT 区域特有的金属原子、离子等作为示踪物, 通过激发它们的共振荧光信号, 可以实现对该高度范围内的温度和风场的探测。与探空火箭、被动遥感以及微波主动遥感等手段相比, 共振荧光激光雷达具备连续观测、高时空分辨率、高精度等优点, 成为探测中间层顶部到热层底部区域温度和风场的有力工具^[2-3]。目前国内外主要采用钠共振荧光激光雷达测量 UMLT 区域的温度和风场^[3-8], 而铁共振荧光多普勒激光雷达凭借自身独特优势, 被认为是 UMLT

区域温度和风场探测的又一理想手段^[9]。

在铁共振荧光多普勒激光雷达的系统中, 激光光源是最重要的组成部分, 要求能输出单频稳频的脉冲激光, 并且还能实现三个频率的分时跳频输出。在研究中, 激光光源采用 Nd:YAG 晶体作为增益介质, 产生 1116 nm 激光, 然后通过两次非线性过程得到 372 nm 的脉冲激光^[10]。为了实现大气温度和风场的高精度测量, 不仅需要通过种子注入技术保证激光以窄线宽、单纵模输出, 还对激光光源的频率稳定性提出了量化需求。由于周围环境的振动、不均匀泵浦强度或冷却强度导致的热扰动, 以及在脉冲建立期间腔长的微小抖动等均会对频率稳定性造成影响。为了获得长期、稳定的种子注入效果, 并确保出射激光频率稳定性满足应用要求, 需实现种子光与腔内振荡模式的精准匹配, 即要求种子光的频率与振荡级上某一个

收稿日期: 2023-01-13; 修订日期: 2023-02-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41875033); 中国科学院国际人才计划项目(2021VEA0006); 安徽省先进激光技术实验室主任基金项目(AHL2020ZR01)

作者简介: 李乘, 男, 博士生, 主要从事铁共振荧光多普勒激光雷达技术方面的研究。

导师简介: 吴德成, 男, 副研究员, 博士, 主要从事激光雷达技术方面的研究。

纵模频率一致,所以要求在种子注入激光器中有腔长控制系统。常见的主动腔长控制技术有建立时间最小化(Q-switch Build-up Time Reduction, QBUTR)、Pound-Drever-Hall (PDH)、谐振探测 (Ramp-Fire, RF) 和改进型谐振探测 (Modified Ramp-Fire, RF-m) 等^[11]。通过以上技术,在泵浦脉冲下降沿附近连续改变振荡级腔长,当判断种子光与腔内振荡模式完成匹配时(腔模匹配),随即打开 Q 开关,当经历数纳秒的脉冲建立时间后,可输出特定频率的脉冲激光。

作为 Nd: YAG 晶体中的高增益谱线, 1064 nm 波长基频光的频率稳定性已经得到了广泛的研究,这些研究对机载和星载 355 nm 测风激光雷达的发展起到了关键作用。2007 年,在实验室环境下, Kolja Nicklaus 等人^[12]通过 PDH、RF-m 和 RF 三种主动腔长控制技术,在 40 s 内实现了均方根 (rms) 为 0.84 MHz、0.24 MHz 和 0.14 MHz 的频率稳定性;同年,在实验室环境下,周军^[13]通过 QBUTR、RF 和 RF-m 技术,在 100 s 内实现了 RMS 为 4.7 MHz、1.81 MHz 和 1.71 MHz 的频率稳定性;随后,王君涛等人^[14]、高永飞^[15]等人又利用 RF-m 技术分别得到了 3.5 MHz@2 min、9.1 MHz@30 min 的实验结果;2017 年,Christian Lemmerz 等人^[11]进行了机载实验,利用 RF-m 技术在 1 min 内实现了 0.56 MHz 的高频率稳定性。而对于在 Nd: YAG 晶体中增益较低的 1116 nm 激光波长,文献 [10] 只提及将 QBUTR 技术应用到 372 nm 机载铁共振荧光多普勒激光雷达中,但是尚未看到其频率稳定性的结果报道。

由于振荡级的输出特性很大程度上决定了整个激光光源性能的好坏,文中针对振荡级的频率稳定性开展研究。利用蒙特卡洛方法,确定了频率稳定性指标;介绍了改进型 Ramp-Fire 种子注入技术,并将该技术应用到振荡级的光路中;通过激光拍频实验,得到了振荡级输出的 1116 nm 脉冲光的频率稳定性。

1 频率稳定性指标

铁共振荧光多普勒激光雷达主要是利用铁原子共振荧光光谱的多普勒展宽特性和多普勒频移特性,采用三频比率多普勒技术,来测量 UMLT 区域的大气温度和径向风速(风速合成后可得到纬向风、经向风以及水平风场)^[2,9,16]。通过对 UMLT 区域大气温度和径向风速的探测需求分析,分别提出了 3 K、3 m/s 的

性能指标。在三频比率多普勒技术中,利用共振荧光谱线在中心频率和两翼频率上的有效散射截面比值,计算得到温度和风速响应函数,从而得到一定范围内的大气温度和径向风速的二维查找表。激光雷达分时测量得到三个频率上的散射回波信号,并计算出响应函数,利用查找表可查找得出每一高度上的大气温度和径向风速,获得相应的垂直分布廓线^[9]。

如果发射的激光脉冲的频率和线宽发生抖动,将会导致激光雷达接收到该频率上的有效散射截面发生变化,从而在得到的温度和径向风速中引入系统误差。先前的研究分析表明^[17], 1 MHz 激光频率抖动引起温度和和径向风速的系统误差分别为 0.25 K 和 0.32 m/s,而 1 MHz 激光线宽抖动造成的温度和径向风速的系统误差分别只有 0.053 K 和 0.015 m/s。因此,测量的温度和风速的精度对于激光频率稳定性更为敏感。

采用蒙特卡洛方法仿真频率稳定性对径向风速测量的影响,仿真次数是 2 000 次。大气温度和径向风速的输入值为 185 K、5 m/s,通过三频比率多普勒技术计算风速响应函数,再利用二维查找表查找得出径向风速的计算值,其中用计算值与输入值之间的差值表示系统误差。

图 1 中给出了频率稳定性对测量的径向风速精度的影响。图 1(a) 和 (b) 分别是 10 MHz(rms) 的频率抖动及其引起的径向风速系统误差 (ΔV) 的仿真结果,风速测量误差统计直方图中平均值 (mean) 为 2 000 组 ΔV 的平均结果,标准差 (std) 用来衡量 2 000 组 ΔV 的离散程度,均方根 (rms) 表示 2 000 组 ΔV 之间的偏差。从图 1(b) 可以看出,虽然仿真的系统误差平均结果在 0 附近,但均方根达到了 3.69 m/s,系统误差绝对值大于 3 m/s 出现的频次有 799 次,意味着在实验时约有一半的激光脉冲频率偏离中心频率 10 MHz 以上,这种偏移量对两翼频率有效散射截面的影响更为明显,使得系统误差大于以光量子噪声为主的随机误差,因此,10 MHz 的频率抖动不能满足设计条件。图 1(c)、(d) 分别是 3 MHz 的频率抖动及其引起的径向风速系统误差的仿真结果,风速测量误差统计直方图显示出频率抖动降到 3 MHz 以后, ΔV 的均方根为 1.13 m/s,超过 1 990 次的 ΔV 位于 -3~3 m/s 之间,其中 1 237 次的 ΔV 在 -1~1 m/s 之间。

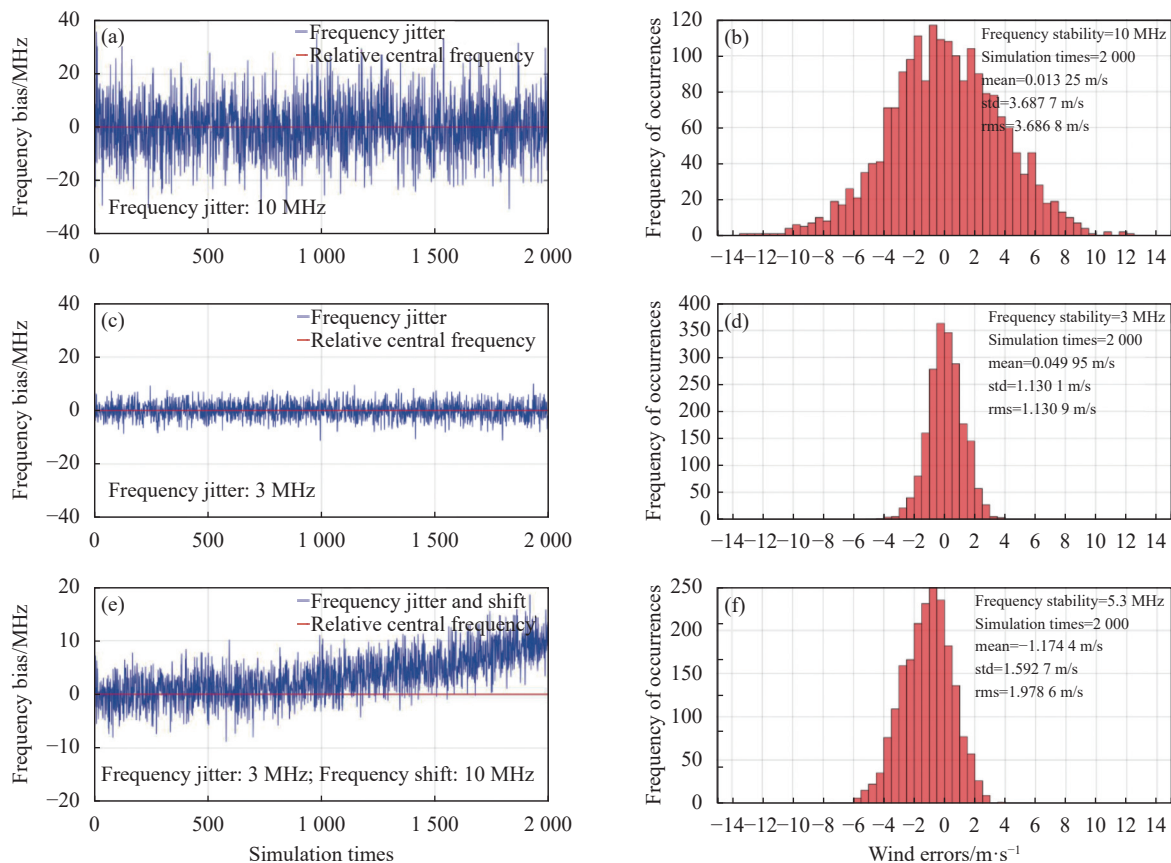


图 1 频率稳定性仿真结果和风速反演统计柱状图。(a) 加入 10 MHz 的频率抖动; (b) 10 MHz 频率抖动造成的风速测量系统误差; (c) 加入 3 MHz 的频率抖动; (d) 3 MHz 频率抖动造成的风速测量系统误差; (e) 加入 3 MHz 的频率抖动和 10 MHz 的频率漂移; (f) 3 MHz 频率抖动和 10 MHz 频率漂移综合影响造成的风速测量系统误差

Fig.1 Simulation results of frequency stability and the inversion statistics histogram of wind velocity. (a) Adding 10 MHz frequency jitter; (b) System errors in wind velocity measurement due to 10 MHz frequency jitter; (c) Adding 3 MHz frequency jitter; (d) System errors in wind velocity measurement due to 3 MHz frequency jitter; (e) Adding 3 MHz frequency jitter and 10 MHz frequency shift; (f) System errors in wind velocity measurement due to combined effects with 3 MHz frequency jitter and 10 MHz frequency shift

上述的仿真是较为理想的情形,在实际探测中激光频率的长期漂移也造成了较大的系统误差。在 2 000 次蒙特卡洛模拟中逐步加入 10 MHz 的频率漂移,频率抖动依然设为 3 MHz,如图 1(e) 所示,此时的频率稳定性约为 5.3 MHz。图 1(f) 是径向风速系统误差 ΔV 的仿真结果, ΔV 平均值相对图 1(d) 出现了较大偏差,约 -1.17 m/s,有 1 726 次的 ΔV 位于 -3~3 m/s 之间,其中只剩下 756 次的 ΔV 在 -1~1 m/s 之间,与图 1(d) 相比,图 1(f) 的准确度有显著降低。

因此,为了满足 3 K、3 m/s 的性能指标,372 nm 铁共振荧光多普勒激光雷达的激光光源必须保证积分时间内的频率稳定性小于 3 MHz。根据频率的对应关系,振荡级输出的 1 116 nm 脉冲光的频率稳定性应

小于 1 MHz。此时,造成的径向风速系统误差约为 1.1 m/s,温度的系统误差约为 0.83 K。

2 频率稳定性实现方法

采用改进型 Ramp-Fire 种子注入技术实现满足设计要求的频率稳定性指标。种子注入是调 Q 激光器输出单纵模的标准技术,其基本原理是将一束频率特性优良的种子光注入到高增益的振荡级内,由于种子光强度远远高于其他自发辐射,会优先在腔内形成振荡,率先建立起脉冲,耗尽反转粒子数,因而可以抑制其他模式起振,实现激光以窄线宽、单纵模输出。根据引言中的描述,从短时间的测试结果来看,列举的主动腔控技术,在实验室无振动环境下,均有能力

将 1064 nm 单纵模 Nd:YAG 激光器的频率稳定性控制在 1 MHz 以内。然而由于 1116 nm 波长的增益较低,造成了脉冲建立时间的延长,这对主动腔控技术的抗干扰能力以及腔长出现抖动后的反馈修复能力提出了更高的要求,因此,笔者尝试采用改进型 Ramp-Fire 种子注入技术,即带偏压反馈的 Ramp-Fire 种子注入技术来实现振荡级输出 1116 nm 脉冲光频率的稳定。

该技术的工作原理示意图如图 2 所示。输入的种子光经二分之一波片、四分之一波片和后背镜(HR₂)进入振荡级,以布儒斯特角入射到偏振片(pol),垂直分量被反射出腔外,水平分量在腔内经过一个往返再次到达偏振片;由于四次经过四分之一波片,偏振态旋转一周仍保持水平分量不变,因此可透过偏振片,随后两次经过四分之一波片,使偏振态变为垂直方向,因而再次到达偏振片时会被反射出腔外。这两部分反射光在光电探测器(PD)靶面上发生干涉,Henderson 等人给出了出现干涉极大值的条件^[18],即

$$k(2nd + 2L_1 + 2L_2 + 2L_3) + 3\pi/2 + \phi_R - \phi_L = 2m\pi, \quad m = 0, 1, \dots \quad (1)$$

式中: n 和 d 为 RTP 晶体的折射率和厚度; L_1 、 L_2 和 L_3 分别为 HR₂ 到 RTP 晶体的光程、RTP 晶体到 pol 的光程以及 pol 到 HR₁ 的光程; ϕ_R 和 ϕ_L 是种子光分解的右旋和左旋圆偏振光偏振态。种子光与腔内振荡模式实现腔模匹配的条件是:

$$k(2nd + 2L_1 + 2L_2 + 2L_3) = 2m\pi, \quad m = 0, 1, \dots \quad (2)$$

如需在干涉波形出现极大值时,实现种子光频率与振荡级纵模频率的匹配,可以通过联立上述公式(1)、(2)得出理论关系式,即:

$$\phi_R - \phi_L = \pi/2 \pm 2m'\pi, \quad m' = 0, 1, \dots \quad (3)$$

因此,可以通过旋转二分之一波片,使种子光在经过四分之一波片之前的线偏振方向与水平方向夹角在 $\pm 45^\circ$ 以内;随后旋转四分之一波片,实现快轴与水平方向一致,可使种子光的偏振态满足公式(3)中的条件。

当入射光通过上述方法被调整到合适的偏振态后,在每个泵浦周期内,利用 Ramp-Fire 控制盒在压电陶瓷 PZT₂ 上施加斜坡扫描电压,对腔长进行微调,当 PD 探测到干涉波形的极大值时,种子光频率与振

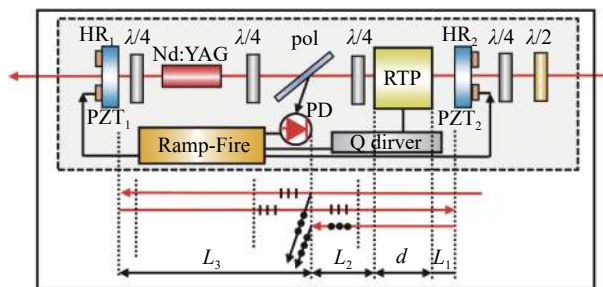


图 2 带偏压反馈的主动腔控技术原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the active cavity control technique with bias feedback

荡级纵模频率完成精准匹配,此时通过 Q 驱动(Q-driver)触发电光调 Q 开关(RTP),随即输出与种子光频率一致的单纵模调 Q 脉冲。

在实际过程中,由于 PD 响应速度有限以及信号处理过程需要时间,使得从检测出干涉极大值到 Q 开关被触发的过程存在一个固定的延时,因此每次打开 Q 开关时刻对应的腔长并不是腔模匹配的最佳位置。为了补偿这个延时,可以再次调整入射光的偏振态,使干涉极大值的位置相对于腔模匹配点有一个固定的相位提前量。由于振荡级的有效腔长约为 0.4 m,纵模间隔约 375 MHz,理论上能够实现种子注入的纵模间隔相移区间约 10 MHz,因此补偿后剩余的偏差即使不进行处理,激光也能够实现稳定的单纵模输出。

利用压电陶瓷对腔长进行扫描,压电陶瓷的非线性效应将会导致固定延期内腔长的伸缩量不会完全一样,从而造成频率的抖动。1116 nm 基频光较长的脉冲建立时间将使频率抖动的问题凸显。针对这个问题,增加了一个用于反馈控制的压电陶瓷 PZT₁,在每一次输出激光脉冲后对上一周期中的腔长漂移进行补偿。将输出镜(HR₁)固定在 PZT₁ 上,根据出光时间的变化,调节加载在 PZT₁ 上的直流偏压,通过实时的反馈控制实现腔长的微调,使每一周期内扫描到干涉极大值的时间基本上位于 PZT₂ 上加载斜坡电压的同一点。

3 实验验证

图 3(a) 是搭建的振荡级光路,其中包含的主要硬件设备参数如表 1 所示。图 3(b) 是随后利用带偏压反馈 Ramp-Fire 种子注入技术扫描腔长时获得的相关波形,其中红色波形是激光二极管泵浦信号;黄色波

形是加载扫描电压之后的干涉信号,考虑到 PZT₂ 在启动时的不稳定性,实验时通过门控电路选取干涉波

形的第 2 个极大值作为调 Q 触发信号;蓝色波形是调 Q 脉冲信号。

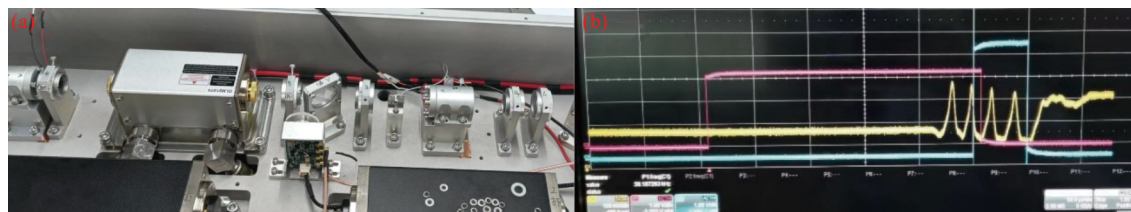


图 3 (a) 振荡级光路; (b) 带偏压反馈 Ramp-Fire 种子注入扫描波形实拍结果

Fig.3 (a) Optical path of oscillator; (b) Photograph of scanning waveform for Ramp-Fire seed injection with bias feedback

表 1 主要硬件设备参数

Tab.1 Parameters of main hardware devices

Device	Parameter	Value
Seeder Laser	Wavelength/nm	1116-1116.5 (tunable)
	Power/W	>2
	Linewidth/kHz	<10
	Frequency stability/kHz	<200@10 h (rms)
	Power stability	<1%@10 h (rms)
Oscillator	LD laser power/W	2500
	Nd:YAG rod size/mm	φ4×100
	Cavity control box	RF-m
Oscilloscope	Sample rate/GS·s ⁻¹	40
	Bandwidth/GHz	16
	Sample precision/bit	8
Detector	Bandwidth/GHz	5
	Rise time/ps	70

采用 5 GHz 带宽的铟镓砷自由空间探测器对激光脉冲波形进行监测。在种子注入之前或入射光偏振态未调整到最佳状态时,振荡级会以多纵模运转,不同纵模间的拍频干涉峰会叠加在脉冲波形上,因此,脉冲曲线就显得非常杂乱,毛刺较多,如图 4(a) 所示;当种子注入成功以后,入射的种子光频率与振荡

级纵模频率完成了较好的匹配,脉冲波形十分光滑,可以证明激光是以单纵模输出,如图 4(b) 所示。

为了验证输出脉冲激光频率的稳定性,利用拍频对脉冲激光频率与种子光频率的差进行监测。由于 1116 nm 种子光具备极高的频率稳定性(如表 1 所示),将其作为频率参考源,通过振荡级输出的脉冲光与该种子光进行拍频,所得频率差可间接反映出脉冲光的频率稳定性^[11,19]。为了能够将拍频信号准确地记录下来,采用 5 GHz 带宽的铟镓砷探测器进行光电转换,并通过采样速率为 40 GS/s 的高速示波器对干涉波形进行采集。该示波器自带快速傅里叶变换功能,选取 hamming 窗作为窗函数后,可直接展示出拍频后的频谱信息,见图 5(a),其中蓝色线表示拍频后的干涉波形,黄色线尖峰位置为两束光间的频率差,其抖动即为振荡级输出脉冲光的频率稳定性。图 5(b) 是 10 min 的频率稳定性的测量结果,平均值为 1.164 GHz,表征了脉冲光与连续光间的频率差;频率峰峰值(pp)为 3.84 MHz,频率 rms 值为 543.24 kHz。因此,从振荡级输出 1116 nm 脉冲光的频率稳定性满足小于 1 MHz 的指标要求,验证了改进型 Ramp-Fire 种子注入技术能够满足文中频率稳定性的要求。根据蒙特卡洛方法,在图 5 所示的频率稳定性条件下,可仿真得到频率

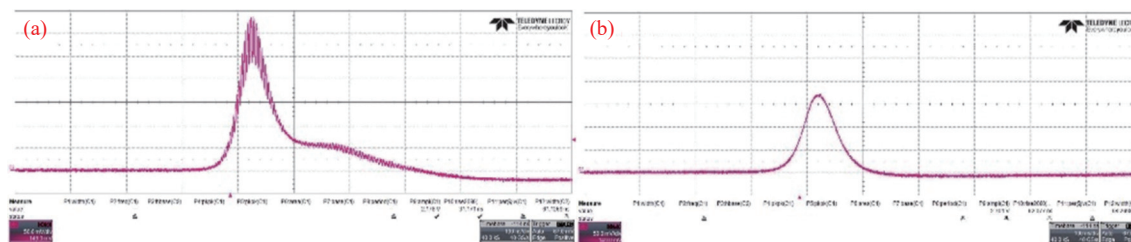


图 4 激光脉冲波形。(a) 种子注入前; (b) 种子注入成功后

Fig.4 Waveform of laser pulse. (a) Before seed injection; (b) After seed successful injection

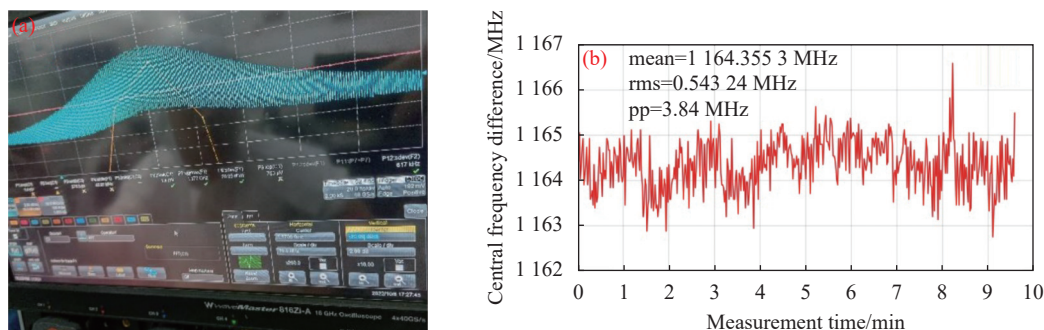


图 5 实验测试结果。(a) 脉冲光与连续光拍频得到的干涉波形实拍图；(b) 振荡级输出脉冲激光频率稳定性测量结果

Fig.5 The results of experimental test. (a) Photograph of the interference waveform obtained by beating frequency between pulsed laser and continuous laser; (b) Frequency stability measurement result of the pulsed laser from the oscillator

抖动和频率漂移引起的系统误差为 0.51 K 和 0.61 m/s。

4 结 论

激光频率的长期稳定是实现大气温度和风场高精度测量的前提，文中对 372 nm 铁共振荧光多普勒激光雷达激光光源的频率稳定性进行了仿真分析和实验研究。通过蒙特卡洛方法，仿真分析了满足测温、测风精度的频率稳定性指标应小于 3 MHz，振荡级的频率稳定性指标为 1 MHz；采用改进型 Ramp-Fire 种子注入技术，实现了激光频率的稳定；通过拍频实验，测量得出了 10 min 内振荡级输出 1 116 nm 脉冲光的频率稳定性为 543.24 kHz。文中开展的研究工作促进了铁共振荧光多普勒激光雷达的实际应用，也为其他具有频率稳定性指标的激光雷达系统提供了研制思路。

参考文献：

[1] She C Y, Friedman J S. Atmospheric Lidar Fundamentals[M]. London: Cambridge University Press, 2022.

[2] Chu X Z, Papen G C. Resonance Fluorescence Lidar for Measurements of the Middle and Upper Atmosphere[M]//Fujii T, Fukuchi T. Laser Remote Sensing. Boca Raton: CRC Press, 2005: 197-450.

[3] Yan Z A, Hu X, Guo W J, et al. Near space Doppler lidar techniques and applications (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 20210100. (in Chinese)

[4] Chu X, Gardner C S, Li X, et al. Vertical transport of sensible heat and meteoric Na by the complete temporal spectrum of gravity waves in the MLT above McMurdo (77.84°S, 166.67°E), Antarctica [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, 127(16): e2021JD035728.

[5] Li T, Fang X, Liu W, et al. Narrowband sodium lidar for the measurements of mesopause region temperature and wind [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(22): 5401-5411.

[6] Krueger D A, She C Y, Yuan T. Retrieving mesopause temperature and line-of-sight wind from full-diurnal-cycle Na lidar observations [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(32): 9469-9489.

[7] Xia Y, Du L F, Cheng X W, et al. Development of a solid-state sodium Doppler lidar using an all-fiber-coupled injection seeding unit for simultaneous temperature and wind measurements in the mesopause region [J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5264-5278.

[8] Kawahara T D, Nozawa S, Saito N, et al. Sodium temperature/wind lidar based on laser-diode-pumped Nd: YAG lasers deployed at Tromsø, Norway (69.6 N, 19.2 E) [J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): A491-A501.

[9] Li C, Wu D C, Deng Q, et al. Simulation and optimization of Fe resonance fluorescence lidar performance for temperature-wind measurement [J]. *Optics Express*, 2022, 30(8): 13278-13293.

[10] Kaifler B, Büdenbender C, Mahnke P, et al. Demonstration of an iron fluorescence lidar operating at 372 nm wavelength using a newly-developed Nd: YAG laser [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(15): 2858-2861.

[11] Lemmerz C, Lux O, Reitebuch O, et al. Frequency and timing stability of an airborne injection-seeded Nd: YAG laser system for direct-detection wind lidar [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(32): 9057-9068.

[12] Nicklaus K, Morasch V, Hoefler M, et al. Frequency stabilization of Q-switched Nd: YAG oscillators for airborne and spaceborne lidar systems[C]//Solid State Lasers XVI: Technology and Devices. SPIE, 2007, 6451: 387-398.

[13] Zhou J. Study of injection-seeded single frequency all solid-state laser[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)

- [14] Wang J, Zhu R, Lu T, et al. Conductively cooled single frequency Nd: YAG laser for remote sensing[C]//International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011: Laser Sensing and Imaging; and Biological and Medical Applications of Photonics Sensing and Imaging. SPIE, 2011, 8192: 832-839.
- [15] Gao Y, Zhang J, Zang H, et al. Stable single-mode operation of injection-seeded Q-switched Nd: YAG laser by sine voltage modulation [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(7): 071401.
- [16] She C Y, Yu J R. Simultaneous three-frequency Na lidar measurements of radial wind and temperature in the mesopause region [J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, 21(17): 1771-1774.
- [17] Gardner C S, Vargas F A. Optimizing three-frequency Na, Fe, and He lidars for measurements of wind, temperature, and species density and the vertical fluxes of heat and constituents [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(19): 4100-4116.
- [18] Henderson S W, Yuen E H, Fry E S. Fast resonance-detection technique for single-frequency operation of injection-seeded Nd: YAG lasers [J]. *Optics Letters*, 1986, 11(11): 715-717.
- [19] Xie J D, Yan L P, Chen B Y, et al. Automatic offset-frequency locking of external cavity diode laser in wide wavelength range [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(2): 211-219. (in Chinese)

Frequency stability study of the laser source for iron resonance fluorescence Doppler lidar

Li Cheng^{1,2}, Wu Decheng^{1,3}, Liu Shuang⁴, Deng Qian^{1,3}, Bi Guojiang⁴,
Wang Bangxin^{1,3}, Wang Zhenzhu^{1,3}, Liu Dong^{1,3}, Wang Yingjian^{1,3}

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230026, China;

4. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract:

Objective Temperature and wind, as important environmental parameters, characterize the state of the atmosphere. In the region of upper mesosphere and lower thermosphere (UMLT, 75-115 km), due to a lack of effective tools, there is a relative lack of observation data. The resonance fluorescence lidar uses metal atoms in the UMLT region as a neutral tracer, and it is possible to measure temperature and wind by stimulating resonance fluorescence signals of the tracer. Among many in-situ and remote sensing measurement methods, the resonance fluorescence lidar, with its high spatial and temporal resolution, high accuracy and continuous observation, has become a powerful tool. Sodium resonance fluorescence lidar is widely used in the world, while iron resonance fluorescence Doppler lidar (Fe lidar) has the advantage of whole day measurement and is also an effective means to measure temperature and wind profile. The narrow-band, frequency-stabilized laser operating at 372 nm wavelength is one of core technology in the development of Fe lidar, especially for wind measurement. To yield pulsed laser with outstanding characteristic of frequency stabilization, a theoretical and experimental study of the frequency stability of laser sources are presented.

Methods The technical solution for the generation of pulsed laser is to use Nd: YAG laser to generate pulsed laser at 1 116 nm wavelength, and then convert to 372 nm wavelength through subsequent second and third harmonic generation. Since the performance of oscillator determines the characteristics of the entire laser system, a theoretical and experimental study of the frequency stability mainly focuses on the oscillator. Frequency stability of pulsed laser at 1 116 nm wavelength from the oscillator is simulated to be less than 1 MHz (RMS) by using the Monte Carlo method (Fig.1). A detailed description for the modified Ramp-Fire method is conducted

(Fig.2), and this technology is used in the optical path of the oscillator (Fig.3(a)). In the beat frequency experiments, because of the high-frequency stability of seeder laser, it can be used as a frequency reference, and the frequency difference can indirectly reflect the frequency stability of the pulsed laser by beating with the continuous-wave laser output from seeder laser. To record the beat frequency signal accurately, an indium gallium arsenic (InGaAs) detector with 5 GHz bandwidth is used for photoelectric conversion, and the interference waveform is acquired by a high-speed oscilloscope with a sampling rate of 40 GS/s. A fast Fourier transform algorithm is applied to the digitized beat frequency signal to obtain the spectrum information.

Results and Discussions Frequency stability of 543.24 kHz root mean square over 10 min is obtained by using beat frequency experiments (Fig.5). It is verified that injection-seeded technique combined with the modified Ramp-Fire method can meet the requirements of frequency stability. According to the Monte Carlo method (Fig.1), the systematic error of temperature and wind measurement are estimated to be 0.51 K and 0.61 m/s.

Conclusions The long-term frequency stability is a prerequisite for the high-precision measurement of temperature and wind. The frequency stability of laser source of Fe lidar is studied in this paper. By Monte Carlo method, the simulation analysis shows that the frequency stability for temperature and wind measurement should be less than 3 MHz at 372 nm wavelength, and thus, it should be less than 1 MHz at 1 116 nm wavelength. In the oscillator, injection-seeded technique combined with modified Ramp-Fire method is applied to maintain resonance with the seeder laser. The frequency stability of pulsed laser output from the oscillator over 10 min was measured to be 543.24 kHz by the beat frequency experiment. This work promotes the practical application of Fe lidar, and it also provides ideas for the development of other lidar systems with frequency stability.

Key words: iron resonant fluorescence Doppler lidar; frequency stability; Monte Carlo method; injection-seeded technique; beat frequency

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (41875033); CAS President's International Fellowship Initiative(PIFI)(2021VEA0006); Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province (AHL2020ZR01)