

单频脉冲激光器的分子吸收光谱频率稳定技术研究

沈红超¹ 吴松华¹ 秦胜光² 刘金涛¹ 张凯临¹ 刘秉义¹

(¹ 中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100; ² 北京华航无线电测量研究所, 北京 100013)

摘要 单频脉冲激光器的频率稳定性显著地影响直接探测多普勒激光雷达的风速测量准确性,工作在半导体抽运 Nd:YAG 激光器倍频 532 nm 的种子注入脉冲激光器的典型自由频率漂移可达 15 MHz/min,相当于 4 m/s 风速误差。基于碘分子吸收光谱稳频原理,采用 Labview 虚拟仪器控制技术,对种子注入脉冲放大式的半导体抽运 Nd:YAG 激光器进行稳频,实现了脉冲激光器的频率扫描、碘分子 1109 光谱吸收线的自动匹配和频率锁定。长时间(大于 2 h)频率漂移标准偏差为 0.8 MHz,等效风速误差为 0.2 m/s,达到直接探测多普勒测风激光雷达长时间测量对脉冲激光器的频率稳定要求。

关键词 激光器; 锁频; 测风激光雷达; 比例积分

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0902010

Frequency Stability Based on Molecular Absorption Spectrum of Single-Frequency Pulse Laser

Shen Hongchao¹ Wu Songhua¹ Qin Shengguang² Liu Jintao¹ Zhang Kailin¹ Liu Bingyi¹

(¹ College of Information Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)
(² Beijing Huahang Radio Measurement Institute, Beijing 100013, China)

Abstract Frequency stability of Q-switched Nd:YAG laser significantly affects the wind measurement accuracy of direct detection Doppler Lidar. The typical free frequency drift of diode-pumped Nd:YAG laser working at doubling frequency 532 nm based on seed injection can reach 15 MHz/min, correspondingly to a weed speed measurement error of 4 m/s. By using virtual instrument control technology of Labview, the frequency of pulsed laser is successfully scanned, and iodine absorption line 1109 is matched automatically, which get the frequency on one of the two slopes of the line. Standard deviation of frequency stability is about 0.8 MHz for a long time (more than 2 h), while the equivalent wind speed error is 0.2 m/s. The requirement of frequency stability is achieved during long-term lidar measurements.

Key words lasers; frequency locking; wind lidar; proportion integration differentiation

OCIS codes 140.3425; 140.3520; 280.3340

1 引 言

高功率的窄线宽稳频激光器是多普勒激光雷达、高光谱分辨率激光雷达的发射光源,也是激光光谱学和非线性光学研究领域所需要的重要激光光源。由于要求较高的激光增益,高功率激光器会产生多模振荡、空间烧孔效应、热致透镜效应和双折射效应等,导致激光单频特性和光束质量下降。在腔内加入波长控制元件,如光栅、棱镜、标准具、可饱和

吸收器等,可以获得高光束质量激光输出,然而对于高功率的调 Q 激光器,调制波长元件容易损坏,激光器的破坏阈值降低,实现起来较为复杂。注入锁频技术^[1],也称种子注入技术,是较简单易行的实现窄线宽、高功率、高光束质量激光发射的方法,其原理是把窄线宽的单纵模连续激光作为种子源,注入到另一高功率振荡腔中,进行功率放大,以获得单纵模、窄线宽、高功率激光输出。

收稿日期: 2014-03-19; **收到修改稿日期**: 2014-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(41375016)

作者简介: 沈红超(1985—),男,硕士研究生,主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: joyshen@foxmail.com

导师简介: 吴松华(1976—),男,博士,教授,主要从事海洋大气激光遥感方面的研究。E-mail: wush@ouc.edu.cn

(通信联系人)

最早关于注入锁定的论文是 Adler 在 1946 年研究电子振荡器的注入锁定现象时发表的^[2]。Hargrove 等^[3-4]对 He-Ne 激光器进行了注入锁定的研究。Danielmeyer 等^[5]采用种子注入的方式成功将调 Q 红宝石激光器的频率锁定在了单频连续 Nd:YAG 种子激光器的频率上。此后,大量的实验和理论研究陆续展开,激光注入锁定技术不断改进,开始应用于各类激光研究及应用领域。同时,利用原子/分子吸收线的稳频实验研究也陆续展开。其原理是利用原子/分子能级跃迁时对特定光谱的吸收现象,将激光频率锁定在饱和吸收线上,此方法简单有效,成本低廉,得到了广泛的研究应用。Wallard^[6]利用碘蒸气的饱和吸收特性对 He-Ne 激光器的频率进行了稳定研究。Kruzhlov 等^[7]成功地将腔内倍频的 Nd:YAG 激光器的输出频率锁定在¹²⁷I₂ 的饱和吸收线上。Arie 等^[8-9]将半导体抽运非平面环形腔的 Nd:YAG 激光器的倍频输出光锁定在¹²⁷I₂ 饱和吸收线上,可以使频率长时间稳定。Zhou 等^[10]利用建立时间最小化技术,研制了种子注入式的单纵模 Nd:YAG 激光器。张俊旋等^[11]设计了种子注入的 Nd:YAG 可调谐绿光激光器,实现了高光束质量、高重复频率、窄脉冲宽度且可调谐的 532 nm 单频绿光的稳定输出。Liu 等^[12-14]结合其在原子滤波器方面的研究成果,研制了直接探测多普勒测风激光雷达系统,并利用碘分子光谱吸收效应对注入种子激光器频率进行了锁定,采用数字比例积分 (PID) 技术将激光器频率稳定在碘吸收线上。上面提到的稳频方法都是将倍频后的激光锁定在原子/分子吸收线上,但用于种子注入基频信号仍然存在一定的频率不稳定性。近年来基于原子分子饱和吸收法和 Pound-Drever-Hall (PDH) 技术的激光稳频方法被国内一些研究者广泛研究与应用^[15-16]。

在直接探测多普勒测风激光雷达中,激光器的频率稳定性对测风精度的影响是显著的。考虑到测风激光雷达对测量精度的需求,对于工作在 532 nm 波长的脉冲激光器,一般要求激光器的频率稳定在 4 MHz/min 以下,相当于 1 m/s 风速测风误差^[17]。本文通过种子注入技术将单纵模连续的种子光注入到脉冲放大激光腔中,实现了单频脉冲激光的放大输出。在单纵模连续激光器、脉冲放大激光器和碘分子吸收池与信号采集与输出板卡 (NI CompactDAQ) 组成的伺服反馈系统所构成的闭环结构中,利用 Labview 虚拟仪器控制技术,实现了对脉冲激光器输出频率的锁定,频率稳定在气态碘在 532 nm 处的强

吸收线上。将脉冲激光器的输出光作为鉴频信号,同时伺服反馈系统的调节信号作用于种子激光器,从而调节注入的种子激光器基频信号的控制注入频率,最终直接稳定了用于测风的激光频率。

2 种子注入式激光雷达结构设计

直接探测多普勒测风激光雷达发射系统整体设计方案如图 1 所示,由三部分组成:1) 种子注入系统;2) 伺服反馈系统;3) 望远镜发射系统。

系统采用非平面环形腔的单纵模 Nd:YAG 连续激光器作为种子激光器和高功率半导体抽运 Nd:YAG 脉冲激光器作为功率放大器,利用种子注入的方式产生二倍频 532 nm (基频 1064 nm) 的高能量、窄线宽、光束质量稳定的单频脉冲激光输出。脉冲放大器主要参数如表 1 所示。单纵模连续激光器主要参数如表 2 所示。

表 1 半导体抽运脉冲激光器主要参数
Table 1 Parameters of pulsed Nd:YAG laser

Laser parameters	Value
Wavelength /nm	532
Repetition rate /Hz	100
Pulse width /ns	10
Pulse energy (532 nm) /mJ	120

表 2 单模连续种子激光器主要参数
Table 2 Parameters of CW laser

Laser parameters	Value
Wavelength /nm	1064
Spatial mode	TEM ₀₀ (M ² < 1.1)
Beam roundness	< 1.1
Frequency stability / (MHz/min)	≈ 10

脉冲激光器发射的 532 nm 激光经光路调节后,绝大部分经由望远镜系统发射到大气中,小部分作为鉴频参考光引入到伺服反馈系统中。伺服反馈系统中碘分子吸收池用来鉴别激光频率,CompactDAQ 采集频率信息并计算出负反馈值来调节种子激光器注入频率,从而调节脉冲激光器的输出频率。之所以把脉冲激光器的输出频率作为锁定对象,是因为一方面脉冲激光器发射的激光是直接探测风速的,故锁定脉冲激光器的频率要比锁定种子激光器更为直接准确地提高风速测量精度;另一方面倘若直接锁定种子激光器,并将其倍频光作为参考光引入鉴频系统,为了使注入状态达到最佳并保证功率放大激光器的效率和稳定性,种子激光器和功率放大激光器的 YAG 晶体增益曲线的峰值必须匹配,这就要求种子激光器和功率放大激光器

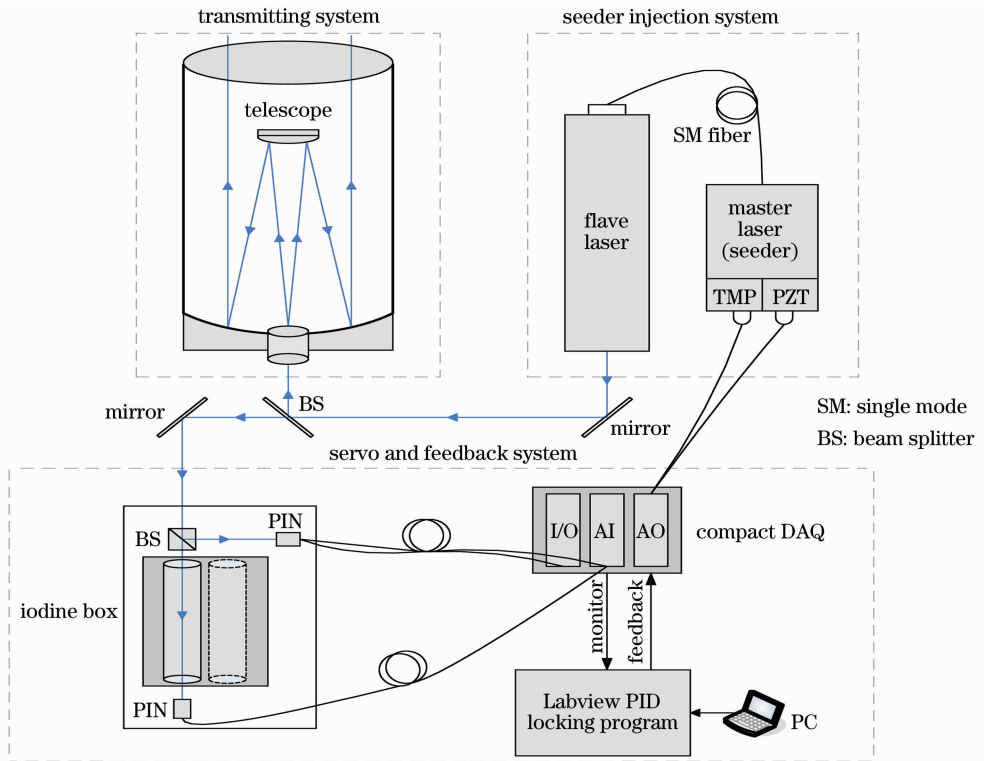


图 1 直接探测多普勒测风激光雷达发射系统

Fig. 1 Transmitting system of diode-pumped Nd:YAG lidar with Seed injection

的工作环境状态参数稳定可靠。影响半导体抽运 Nd:YAG 固体激光器频率稳定的因素主要是激光器晶体工作温度的漂移和激光器驱动电流的变化。脉冲激光器的控制包括：谐振腔长控制、内循环水温控、驱动电流控制、空间烧孔抑制和防震等；种子激

光器的控制包括：超高精度稳频、频率扫描和温控。对于连续的半导体激光器而言，其所需的高稳定性电源的技术已经非常成熟，驱动电流的检测和控制技术相对简单可靠。通过一些被动措施，如防震、隔声、屏蔽、冷却、稳定电源等方式可对激光驱动电流

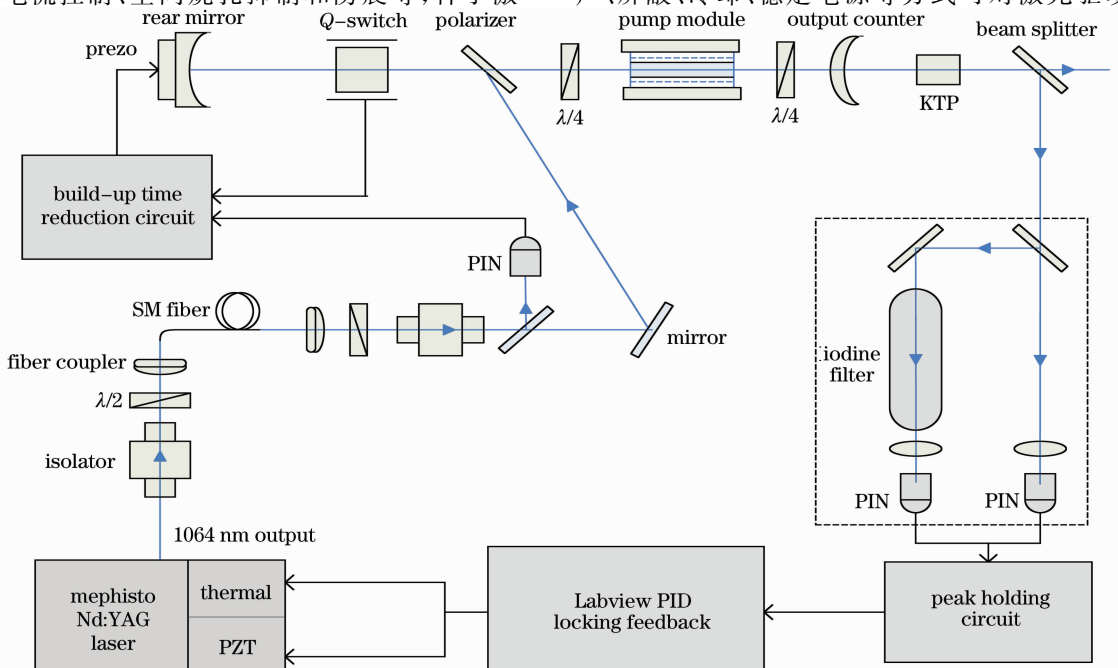


图 2 种子注入激光器及伺服反馈系统光电闭环结构

Fig. 2 Photoelectric closed-loop of seed injection laser and servo feedback system

和工作环境温度进行初步稳定。但这些举措具有一定的局限性,实际的工作环境变化较大且不可预期,很难满足雷达对测量精度的要求。

种子注入激光器及伺服反馈系统光电闭环结构如图 2 所示,包括单模 Nd:YAG 连续激光器种子注入、法拉第隔离器、半导体抽运 Nd:YAG 脉冲激光器光学结构、Q 开关建立时间最小化电路和基于分子吸收谱的频率稳定电子学控制系统。法拉第隔离器提供在种子激光和脉冲激光器之间的必要隔离,保护种子激光器不受可能的损害并抑制不稳定的反馈进入种子激光器的谐振腔,Q 开关建立时间最小化电路使种子激光和脉冲激光实现最优的频率重合。碘分子吸收池的工作温度由温控系统精确控制,确保碘的气化、吸收谱线的稳定。通过 Labview 电子学反馈控制系统输出信号来调节种子激光器的温度通道和压电陶瓷(PZT)通道工作电压来调节频率。

3 锁频方案设计

将一个外部光信号(通常是低功率稳定的单频

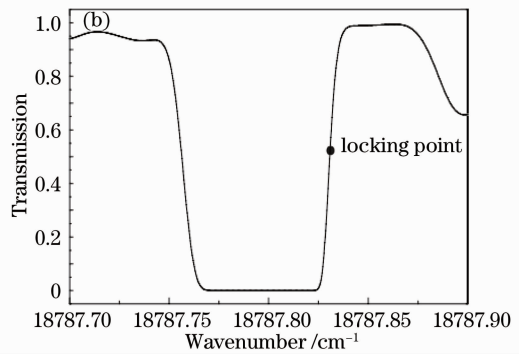
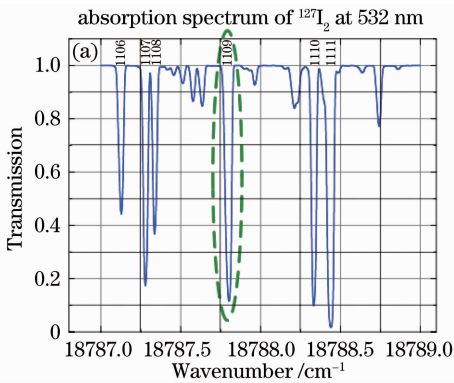


图 3 (a) $^{127}\text{I}_2$ 在 532 nm 处的部分吸收谱线; (b) $^{127}\text{I}_2$ 在 532 nm 处的吸收线 1109 线的锁频点

Fig. 3 (a) Absorption spectrum of $^{127}\text{I}_2$ at 532 nm; (b) line 1109 for frequency locking of absorption spectrum of $^{127}\text{I}_2$ at 532 nm

多普勒测风激光雷达系统所使用的种子激光器为高稳定性单模 1064 nm 连续激光器,注入到功率放大脉冲激光器,通过倍频输出 532 nm 激光。根据现有系统结构,锁频方案基于气态碘分子在 532 nm 处的强吸收,采用碘分子吸收池为鉴频器,利用工控计算机和基于 CompactDAQ 测控技术组成的伺服反馈虚拟仪器系统实现对脉冲激光器的频率锁定。CompactDAQ 系统包含了机箱、I/O 模块及软件。CompactDAQ 机箱负责控制定时、同步以及外部/内置计算机和多达 8 个 I/O 模块之间数据传输。一台 CompactDAQ 机箱可同时管理多个定时引擎,在相同系统内运行多达 7 个不同采样率的独立硬件定

光)引入一个高增益的激光谐振腔,在谐振腔的纵模间隔远大于引入光信号的线宽并且引入的光信号强度远大于增益介质的自发辐射强度时,若引入信号频率与高增益谐振腔的某个纵模频率足够接近,则引入信号会自动相移到该纵模频率处,在其他纵模增长之前使增益介质饱和,耗尽增益介质中存贮的能量,抑制自发辐射产生的脉冲进一步放大和增长,从而产生与引入信号频率相同的脉冲激光输出,实现频率锁定。在上述过程中,注入信号犹如一颗种子,所以常将这种注入锁定方式称为种子注入锁定。种子注入锁定技术主要是指将大功率脉冲激光器(又称从激光器)的输出频率锁定在注入的种子激光器(又称主激光器)频率上的技术。

气态碘 B→X 态跃迁在可见光波段有约 20000 条吸收线,其中部分吸收线位于 Nd:YAG 激光器的二次谐波 532 nm 附近^[18-19],如图 3(a)所示。利用 532 nm 附近碘吸收线第 1109 线,将频率锁定在 1109 线吸收翼的侧翼上,锁频点如图 3(b)所示,锁频点的波数为 18787.830 cm^{-1} 。

时 I/O 任务。系统配置的测控单元包括 NI CompactDAQ-9184 4 槽以太网机箱、NI 9215 4 路同步采样模拟输入模块、NI 9263 4 路同步更新采样模拟输出模块和 NI 9401 8 通道超高速数字 I/O 模块。NI 9215 和 NI 9401 组成的采集模块通过采集透过碘吸收池的激光能量鉴别出激光频率,NI 9263 模拟输出模块通过改变种子激光器工作时晶体温度和谐振腔长来控制激光频率。首先通过扫描种子激光器的晶体温度通道电压将激光频率调在碘光谱吸收线 1109 线的吸收翼中点,其次通过伺服反馈系统调控种子激光器的谐振腔长控制电压和晶体温度控制电压将发射激光频率锁定在吸收线中点。

研究所采用的种子激光器是 Innolight 公司的 MEPHISTO 系列, 波长为 1064 nm。种子激光器典型的调节特性如表 3 所示, 频率随温度的变化特性如图 4 所示。表 3 中, 在激光器温度允许范围内, 频率调节范围 30 GHz。图 4 中, 当温度连续变化时, 腔内模式会发生跳变。不发生跳模的情况下, 每个模式的调节范围为 6~8 GHz。温度通道调节系数为 3 GHz/K, 响应带宽为 1 Hz, 调节范围大且响应慢, 故可用来扫描碘分子吸收光谱和慢速调谐激光频率。PZT 通道的电压调节范围 ±100 V, 调节范围为 ±100 MHz。PZT 通道调节系数 1 MHz/V, 响应带宽为 100 kHz, 虽然调节范围有限但响应快, 可以在锁频点附近进行快调, 使频率稳定。实验时必须注意过高的电压或者过快的调节频率都有可能损坏激光器。

锁频所采用的方法是将脉冲激光器分离出来的鉴频光通过 BS 分为两束, 一束作为参考的能量通道, 一束作为碘分子吸收池通道, 引入温度精确控制的碘分子吸收池鉴频系统。然后将采集到的透射率信号作为反馈调节种子激光器的工作参数。

表 3 种子激光器典型调节特性

Table 3 Typical tuning parameters of seeder laser

Specifications (1064 nm)	Value
Thermal tuning coefficient / (GHz/K)	-3
Thermal tuning range / GHz	30
Thermal response bandwidth / Hz	≈1
PZT tuning coefficient / (MHz/V)	≈1
PZT tuning range / MHz	±100
PZT response bandwidth / kHz	100

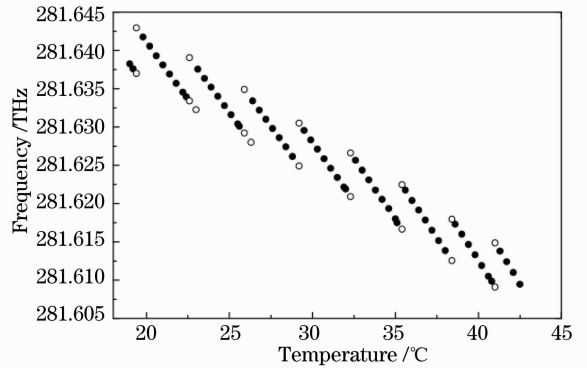


图 4 1064 nm 处种子激光器温度调节特性表

Fig. 4 Thermal tuning parameters of seed laser at 1064 nm

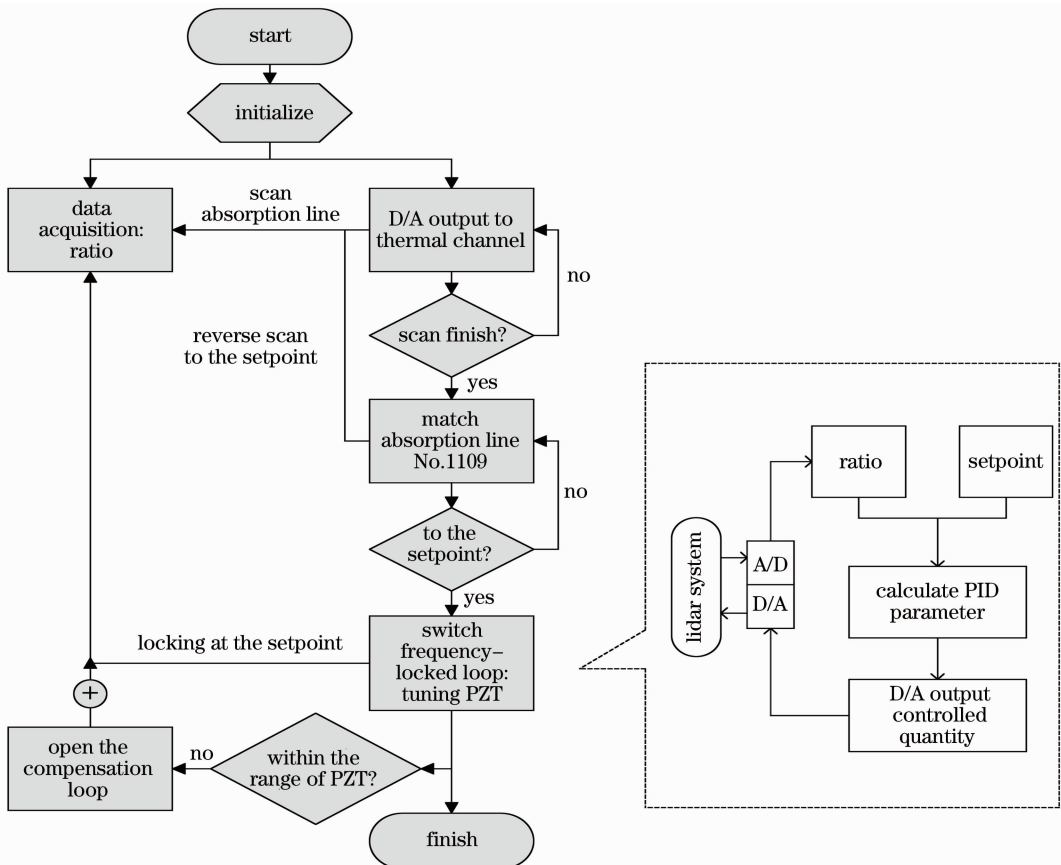


图 5 Labview 自动锁频程序流程框图

Fig. 5 Program flow chart of frequency auto locking by Labview

当激光器工作在设定波长时,激光频率的微小漂移便能够引起碘吸收池通道的光透射率的很大变化。将这两束激光分别由 PIN 光电二极管探测后转化为电信号,由 CompactDAQ 模拟输入采集板卡采集。激光脉冲频率为 100 Hz,采用重触发方式,当探测电路的 PIN 管探测到激光脉冲时,会随探测信号同步产生符合 TTL 标准的电压值为 5 V 的高电平信号。利用 NI 9401 采集这个信号作为开始采集触发信号,只有 NI 9401 采集到这个触发信号时,NI 9215 才会采集,采集固定样本后停止,等待下一次触发信号,这样便实现了可重触发信号采集,从而实现了信号的精确采集。利用信号透射率的变化作为反馈,通过 Labview 虚拟仪器编程技术控制 CompactDAQ 机箱中的 NI 9263 模拟输出板卡输出信号来调节种子激光器工作环境参数(激光器晶体温度和谐振腔长),将激光频率锁定在碘吸收线的中点。

程序设计时要实现三个基本功能:1)频率扫描,利用种子激光器温度通道扫描出碘吸收曲线;2)碘线匹配,自动识别并匹配 1109 线;3)自动锁频,将频率锁定在 1109 吸收线的侧翼的中点;程序设计框图如图 5 所示,D/A 表示数模,A/D 表示模数。

4 比对结果分析

系统工作时,激光频率被锁定在碘分子吸收线 1109 线右侧吸收翼的中点,锁频点的波数绝对值为 18787.830 cm^{-1} 。为了使测量的结果更为准确,必须保证碘吸收池的环境稳定性,特别是温度稳定性。实验时,碘吸收池采用数字 PID 控制的温控系统,有效保障了碘池温度的稳定,碘指温度为 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$,控制精度为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$;碘壁温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,控制精度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图 6 为实际扫描到的 1109 碘吸收线。

实验首先测试了无程序控制的情况下激光器的

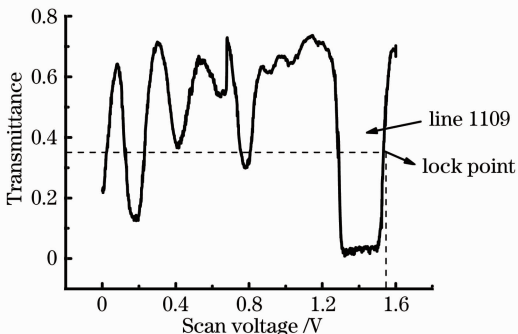


图 6 碘分子 1109 吸收线及工作锁频点

Fig. 6 No. 1109 iodine absorption line and lock point

自由频漂。系统随时间的自由频漂和稳定性结果如图 7 所示。Labview 锁频程序调节激光器的频漂和稳定性结果如图 8 所示。在无程序控制下的自由频漂 15 MHz/Min ,频漂的标准差在 2.5 MHz 左右。由程序控制的锁频系统测试得到的结果显示,频率被锁定在 1109 吸收线的中点,频漂标准差在 0.8 MHz 左右。

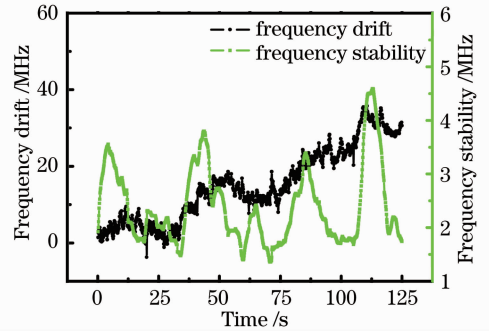


图 7 激光频率随时间的自由频漂和稳定性

Fig. 7 Free frequency drift and frequency stability of laser in time

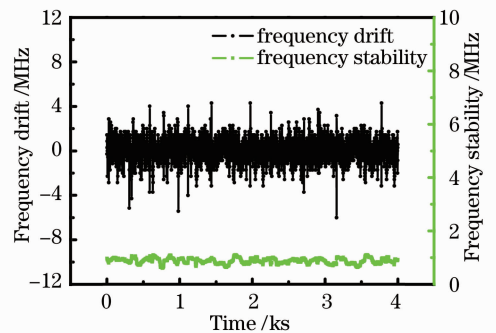


图 8 由 Labview 锁频程序调节激光器的频漂和稳定性结果

Fig. 8 Frequency drift and stability of laser by Labview program controlling

5 结 论

利用原子/分子饱和吸收法将激光频率锁定在吸收线上是简单有效的办法。利用气态碘分子光谱吸收特性,结合 Labview 虚拟仪器控制技术,将种子注入脉冲放大式的半导体抽运 Nd:YAG 激光器频率稳定在碘分子吸收线 532 nm 附近 1109 线的侧翼上。完成了脉冲激光器的频率扫描、碘分子 1109 光谱吸收线的匹配和频率锁定的自动化控制过程。经过实际测试,长时间(大于 2 h)频率漂移标准偏差保持在 0.8 MHz 左右,等效风速误差为 0.2 m/s ,达到直接探测多普勒测风激光雷达对脉冲激光器频率稳定的要求,同时验证了通过虚拟仪器控制技术来

锁定脉冲激光器频率的可行性。

参 考 文 献

- Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong. Laser Principles[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. 230—235.
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 230—235.
- Sasano Y, Browell E V. Light scattering characteristics of various aerosol types derived from multiple wavelength lidar observations[J]. Appl Opt, 1989, 28(9): 1670—1679.
- Hargrove L, Fork R, Pollack M. Locking of He-Ne laser modes induced by synchronous intracavity modulation[J]. Appl Phys Lett, 2004, 5(1): 4—5.
- Stover H, Steier W. Locking of laser oscillators by light injection [J]. Appl Phys Lett, 1966, 8(4): 91—93.
- Danielmeyer H. Stabilized efficient single-frequency Nd:YAG laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1970, 6(2): 101—104.
- Wallard A. Frequency stabilization of the helium-neon laser by saturated absorption in iodine vapour[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1972, 5(9): 926—930.
- Kruzhalov S, Parfenov V A, Pakhomov L, *et al.*. Frequency stabilization of a Nd:YAG laser by means of (I-127) 2 absorption lines[J]. Techn Phys Lett, 1985, 11: 111—112.
- Arie A, Schiller S, Gustafson E K, *et al.*. Absolute frequency stabilization of diode-laser-pumped Nd:YAG lasers to hyperfine transitions in molecular iodine[J]. Opt Lett, 1992, 17(17): 1204—1206.
- Arie A, Byer R L. Frequency stabilization of the 1064-nm Nd:YAG lasers to Doppler-broadened lines of iodine[J]. Appl Opt, 1993, 32(36): 7382—7386.
- Zhou J, Yu T, Bi J, *et al.*. Diode pumped injection seeded Nd:YAG laser[J]. Chin Opt Lett, 2006, 4(5): 292—293.
- Zhang Junxuan, Li Feng, Bi Decang, *et al.*. Tunable single longitudinal mode Nd:YAG green laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0902009.
张俊旋, 李峰, 毕德仓, 等. 可调谐单纵模绿光 Nd:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0902009.
- Liu Z, Wu S, Liu B. Seed injection and frequency-locked Nd:YAG laser for direct detection wind lidar[J]. Opt & Laser Technol, 2007, 39(3): 541—545.
- Wu S, Liu Z, Liu B. Automatic laser frequency stabilization to iodine absorption line[J]. Opt & Lasers in Eng, 2007, 45(4): 530—536.
- Wu S, Liu Z, Liu B. Dual-wavelength laser frequency locking for the direct-detect wind lidar[J]. J Modern Optics, 2006, 53(3): 333—341.
- Liu Qiang, Zhang Junhai, Zeng Xianjin, *et al.*. Continuously tunable and frequency-stabilized laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 127—131.
刘强, 张军海, 曾宪金, 等. 锁频点连续可调的激光器稳频技术[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 127—131.
- Bian Zhenglan, Huang Chongde, Gao Min, *et al.*. Research on control technique for pound-drever-hall laser frequency stabilizing system[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0302001.
卞正兰, 黄崇德, 高敏, 等. PDH 激光稳频控制技术研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0302001.
- Chanin M, Garnier A, Hauchecorne A, *et al.*. A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere[J]. Geophysical Research Letters, 1989, 16(11): 1273—1276.
- Wu Songhua. Key Technologies of High Spectral Resolution Wind Measurement by Laser with High Stability [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2001. 27—38.
吴松华. 高稳定性高光谱分辨率激光测风系统关键技术[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2001. 27—38.
- Gerstenkorn S, Luc P. Atlas du spectre d'absorption de la Molecule d'Iode 14800-20000 cm^{-1} [J]. Paris: Editions du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), 1978. 1.

栏目编辑: 何卓铭