

532 nm 测风激光雷达长时间稳频系统

郭文杰^{1,2}, 闫召爱¹, 胡 雄¹, 郭商勇¹, 程永强¹

(1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 中国科学院国家空间科学中心 (空间中心) 研制的 532 nm 多普勒激光雷达主要用于测量临近空间的大气风场、温度和密度等参数。获得单一的、稳定频率的出射激光是该多普勒激光雷达正常运转的关键技术。该激光雷达采用种子注入技术来获得单模的脉冲光, 并通过将种子激光锁定在碘分子吸收线的方法来获得稳定的激光频率。调节种子光频率的方法有压电换能晶体(PZT)调节和温度调节两种机制。PZT 调节的特点是调节速度快但调节范围窄, 而温度调节的响应速度慢但调节范围大。通过协调两种调频机制, 并利用比例-积分-微分(PID)控制算法, 设计了一套长期稳定的锁频系统。该系统大大降低了对采集卡输出电压范围的要求, 并可以使长时间的、大范围的频率漂移由调频较宽的温度调节来响应, 而瞬时的频率漂移由响应速度较快的 PZT 调节来响应, 从而保证了系统的长时间运行。该稳频系统的稳频精度可以达到 350 kHz。连续工作时长可达 20 h 以上。

关键词: 激光光学; 激光雷达; 多普勒; 稳频

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S130004

Long-term frequency stabilization system in 532 nm wind lidar

Guo Wenjie^{1,2}, Yan Zhaoai¹, Hu Xiong¹, Guo Shangyong¹, Cheng Yongqiang¹

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

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

Abstract: The 532 nm Doppler lidar developed by the National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, is mainly used to measure the atmospheric wind field, temperature, and density. Maintaining a same reference frequency is a key technology to ensure the normal operation of the Doppler lidar. This lidar system uses seed injection technique to obtain a single mode pulse laser, and maintains the same reference frequency by locking the seed laser into the iodine absorption line. The frequency of the seed laser can be adjusted by two mechanisms: applying a voltage to a piezoelectric (PZT) crystal or changing the temperature of the laser crystal. The response speed of the two kinds of tuning mechanism is different. PZT tuning has a fast response speed but a narrow tuning range, while the thermal tuning has a wide tuning range and a low response speed. A long-term frequency stabilization system was designed by coordinating the two kinds of frequency tuning mechanism. And a Proportion Integration Differentiation (PID) algorithm was used to calculate the feedback voltage. The system did not require a acquisition card with a large range of output voltage. In this system, the laser frequency drift in long term and large

收稿日期: 2016-02-03; 修订日期: 2016-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(41104100); 中国科学院科研装备研制项目(YZ201130)

作者简介: 郭文杰(1989-), 男, 博士生, 主要从事激光雷达方面的研究。Email: gwj2127@163.com

导师简介: 胡雄(1967-), 男, 研究员, 主要从事临近空间环境研究方面的研究。Email: xhu@nssc.ac.cn

range will be tuned by thermal tuning mechanism, while the instantaneous frequency drift will be responded by PZT tuning. The accuracy of the new frequency stabilization system is 350 kHz. The system can work well as long as twenty hours.

Key words: laser optics; lidar; Doppler; frequency stabilization

0 引言

中国科学院国家空间科学中心(空间中心)研制的 532 nm 多普勒激光雷达主要用于测量临近空间的大气风场、温度和密度等参数。该激光雷达采用种子注入技术获得窄线宽的脉冲激光,使用碘分子吸收光谱仪作为高分辨率光谱检测器件,通过测量大气后向散射光的多普勒频移量来计算大气风场,因此发射激光频率的稳定性是影响风速测量准确性的关键因素^[1-3]。目前,激光雷达系统中锁定激光频率的方法有多种,采用较多的是将种子激光的频率锁定在法布里-帕罗腔或原子、分子吸收线上^[4-7]。如中国海洋大学测风激光雷达系统采用的锁频方法就是将种子激光锁定在碘分子 1109 吸收线上,采用比例-积分-微分(PID)控制方法对种子激光进行调频,得到了很好的锁频结果^[8]。该方法以激光通过碘分子滤波器后的透过率值作为反馈输入,通过温度以及 PZT 两种调频机制来使得种子激光频率稳定在同一个值。

在空间中心 532 nm 多普勒激光雷达系统设计之初,也采用将种子激光锁定在碘分子吸收线的方法,以激光通过碘分子滤波器后的透过率值作为反馈输入,采用 PID 控制方法对种子激光进行温度调频以及压电晶体(PZT)调频,得到了很好的锁频结果。但在日常实验观测中,经常会发生下述情况:随着锁频时间的增加,PZT 的 PID 控制算法的输出绝对值不断增大,最终会因超过输出限制(由采集卡所能输出的电压以及 PZT 所能承受的最大电压决定,本系统为 8 V)而失锁。笔者经过分析认为该现象的原因是:环境温度等因素的变化使得激光频率发生变化,温度与 PZT 用 PID 算法同时进行频率锁定,PZT 响应速度在 10 μ s 的量级,温度的响应时间为 1 ms 的量级,因此在锁频过程中 PZT 调节起主要作用。但随着激光频率漂移量逐步变大,会使得 PZT 的电压逐步增加,当激光频率漂移范围足够大时,将

会导致 PZT 调节的输出电压超出采集卡输出电压范围或者 PZT 器件可承受的范围,这时便会引起频率失锁,需要重新进行程序设定。

解决上述问题的关键在于如何使响应较慢、调节范围较宽的温度调节发挥作用,对长时间累积的频率漂移量进行有效调节,从而使 PZT 的输出不至于过大。考虑到两者同时调节时,响应速度慢的温度调节未能起到作用,因此文中首先单独用 PZT 调频进行频率锁定。PZT 调频的输出电压反映了激光频率随时间的漂移量,而该漂移量需要用温度调频来修正。因此,以 PZT 调频的 PID 算法的输出作为温度 PID 控制调节的输入,以 0 值作为设定值进行 PID 控制。通过温度调节使 PZT 的输出尽量维持在 0 值附近。为了防止引起较大的频率震荡,将 PZT 输出电压先进行衰减再作为温度调节的输入。经过实验调节发现衰减系数以 10 \times 温度调频系数/PZT 调频系数为最佳,可进行适量调节。通过调节温度控制的 PID 参数使得稳频结果达到最优。

1 稳频系统设计

稳频系统结构如图 1 所示。该系统主要包括种子激光器、碘分子鉴频器、数据采集卡、探测器、计算机等器件。种子激光器发射可调频的连续激光,经过

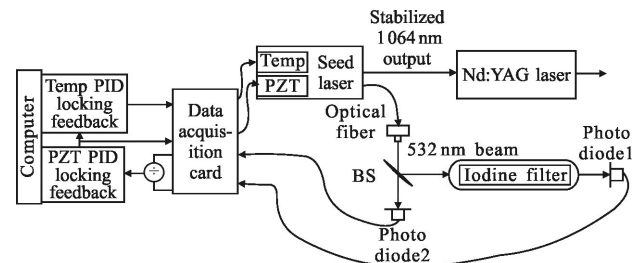


图 1 稳频系统结构示意图

Fig.1 Structure of frequency stabilization system

分光之后一路光由探测器 2 直接探测其光强,另一路光经过碘分子鉴频器后由探测器 1 探测光强。探测器 1 的测量值与探测器 2 的测量值的比值为激光

经过碘分子鉴频器的透过率,它反映了激光的频率。PZT 调频控制系统以此透过率值为输入计算修正当前激光频率所需的反馈电压,而温度调节控制系统以 PZT 反馈系统的输出电压为输入值计算修正激光频率的长时间漂移所需的输出电压。

种子激光器采用德国 Innolight GmbH 公司 Prometheus 连续光激光器,可以通过改变激光晶体的温度或改变激光晶体上的 PZT 晶体的电压对激光频率进行调频。其主要参数由表 1 给出。

表 1 种子激光器主要参数

Tab.1 Main parameters of seed laser

Parameter	Value
Thermal tuning coefficient/GHz·K ⁻¹	-6
Thermal tuning range/GHz	60
Thermal response bandwidth/Hz	1
PZT tuning coefficient/MHz·V ⁻¹	>2
PZT tuning range/MHz	±200
PZT response bandwidth/kHz	100
Frequency drift/MHz·min ⁻¹	2

种子激光器包含两个输出通道,1 064 nm 通道的激光经光纤耦合进入 Nd:YAG 激光器作为其种子光;1 064 nm 激光经倍频得到 532 nm 的激光用于频率稳定。

数据采集卡采用了美国国家仪器公司的 NI USB-6259 BNC 产品。NI USB-6259 BNC 是一款高性能多功能 DAQ 模块,在高采样率下也能保持高精度,具有 16 路模拟输入、4 路模拟输出。表 2 给出了采集卡的主要参数。该采集卡模拟输出电压最大为±10 V,出于对设备保护的考虑,稳频计算机软件将数据输出限定在±8 V。

碘分子鉴频器所用的碘泡长度为 10 cm,温度控制在 60℃附近,并与信号接收子系统的碘泡进行温度标定,使两者的吸收线具有相同的带宽。碘分子吸收线在不同的温度下会有不同的吸收线宽度,为了减小由温度变化引起的激光透过率变化,对碘泡进行温度控制,控制精度为±0.01℃。采用碘分子 1111 吸收线的两个边缘进行锁频,其原因是在系统调试过程中发现,在碘分子 1111 吸收线附近,种子激光的波长与脉冲激光器腔长相匹配,可以得到较好地注入效果。通过改变激光晶体的温度,扫描了碘分子

对种子激光的吸收谱线,并采用德国 High Finesse 公司的高精度 WSU2 波长计测量了种子激光的波长。该波长计测量精度可以达到 2 MHz,频率分辨率为 0.5 MHz。图 2 为激光扫频得到的归一化的碘分子吸收线 1111 线,横轴采用了相对频率,其零点对应的频率值为 563 260 936 MHz。实验观测中首先通过改变激光晶体温度扫描得到该吸收谱线,再将频率稳定在右侧透过率 0.5 的位置。

表 2 采集卡主要参数

Tab.2 Main parameters of data acquisition card

Analog input	Value	Analog output	Value
Number of channels	16	Number of channels	4
ADC resolution	16 bits	DAC resolution	16 bits
Sampling rate	1.00 MS/s	Maximum update rate	2.00 MS/s
Timing accuracy	50 ppm of sample rate	Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Timing resolution	50 ns	Timing resolution	50 ns
Input coupling	DC	Output coupling	DC
Maximum input range	±10 V	Maximum output range	±10 V

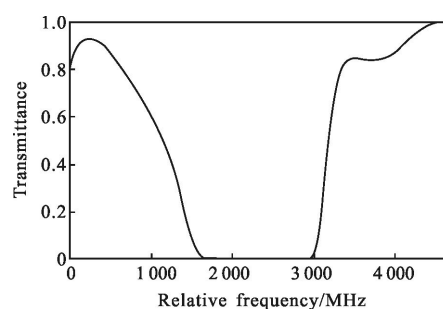


图 2 碘分子 1111 吸收线

Fig.2 Iodine absorption line 1111

2 锁频程序设计

频率锁定由扫描和稳定两个过程组成。由于很难直接确定锁频点的准确位置,因此需要先进行碘分子吸收线扫描以确定锁频点的大致位置,以此位置为起始点进行频率锁定。根据当前频率与设定频率的透过率的差值,利用 PID 控制算法来计算反馈电压值大小。反馈电压 $u(k)$ 的计算公式如下:

$$u(k)=K_p \left[e(k) + \frac{T_s}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T_s} (e(k) - e(k-1)) \right] + u_0 \quad (1)$$

式中： $e(k)$ 为误差； T_s 为取样周期； T_I 为积分时间； T_D 为微分时间；定义 K_p 为比例系数； K_I 为积分系数； K_D 为微分系数。可以将公式(1)写为更普遍的 PID 控制方程^[9]：

$$u(k)=K_p e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D (e(k) - e(k-1)) + u_0 \quad (2)$$

2.1 PZT 的 PID 控制

对于 PZT 控制,其初始控制电压为 0,因此控制方程为:

$$u_{\text{PZT}}(k) = K_{\text{PZT}} e_{\text{PZT}}(k) + K_{\text{I}_{\text{PZT}}} \sum_{j=0}^k e_{\text{PZT}}(j) + K_{\text{D}_{\text{PZT}}} (e_{\text{PZT}}(k) - e_{\text{PZT}}(k-1)) \quad (3)$$

式中： $e_{\text{PZT}}(k)$ 为激光通过碘分子鉴频器后实际归一化透过率值与设定值之间的差。

2.2 温度 PID 控制

温度调节通过控制 PZT 输出电压间接消除激光频率的大范围漂移。其控制方程为:

$$u_T(k) = K_{\text{PT}} e_T(k) + K_{\text{IT}} \sum_{j=0}^k e_T(j) + K_{\text{DT}} (e_T(k) - e_T(k-1)) + u_{T_0} \quad (4)$$

式中： $e_T(k)$ 为 PZT 控制的输出电压与零值之间的差。

通过调节温度控制和 PZT 控制各自的 PID 参数(K_p, K_I, K_D)使得输出激光锁频效果达到最优。

3 实验结果

3.1 激光频率的长时间漂移对稳频结果的影响

激光器在不作调频控制的状态下出射激光的频率会随时间单方向漂移。利用将激光频率稳定在相同的频率值所需的补偿量计算了该系统中激光器频率的长时间漂移。频率漂移曲线如图 3 所示,激光频

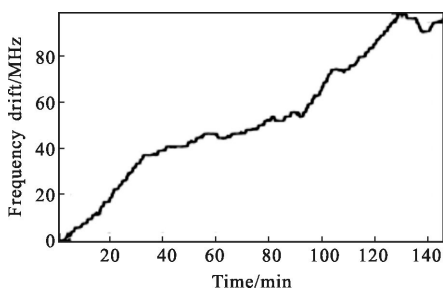


图 3 激光频率的漂移曲线

Fig.3 Curve of laser frequency drift

率在两个多小时的时间里漂移了近 100 MHz。以 PZT 的调频系数计算,要获得稳定的频率需要采集卡可以输出 50 V 的电压;而以温度的调频系数计算,只需要 0.016 7 V 的电压。

系统设计之初,温度调频系统与 PZT 调频系统同时以激光经过碘分子的透过率值为输入来进行激光频率稳定。记录了一段时间的稳频结果。图 4 为频率稳定结果,图 5 为 PZT 调节电压的变化曲线。从两图中可以看出,稳频开始时得到了很好的稳定结果,但随着激光频率漂移量的增加,PZT 的输出电压不断增加,当 PZT 电压超过系统的输出范围 8 V 时,导致系统失锁。此时需要先停止 PZT 稳频系统,使温度调节系统来补偿 PZT 修正的频率漂移,然后再开启 PZT 锁频系统。该实验表明了激光器的频率漂移速度、采集卡的输出范围以及 PZT 的可承受电压是影响锁频时长的关键因素。

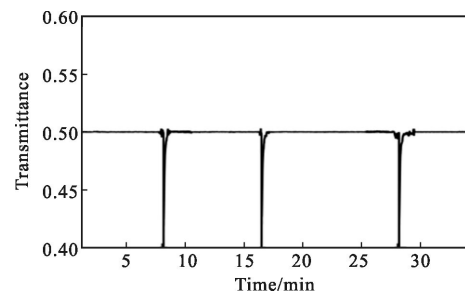


图 4 长时间的频率漂移对稳频结果的影响

Fig.4 Influence of long-term frequency shift on the frequency stabilization

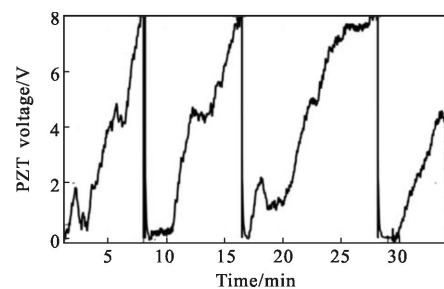


图 5 频率漂移对稳频过程中 PZT 调节电压的影响

Fig.5 Influence of frequency shift on the PZT tuning voltage during frequency stabilization

3.2 532 nm 激光雷达长期稳频系统测试结果

对 532 nm 激光雷达的长期稳频系统进行测试,图 6 为稳频透过率变化曲线,图 7 为 PZT 调节电压

的变化曲线。从图 6 中可以看到透过率基本可以维持在 ± 0.001 以内,根据图 2 将透过率精度换算为频率锁频精度约为 350 kHz。PZT 的电压基本维持在 ± 0.5 V 以内,并且有很好频率锁定结果。在最长的一次实际观测实验(20 h)中,该系统可以正常运行,不会发生失锁问题。

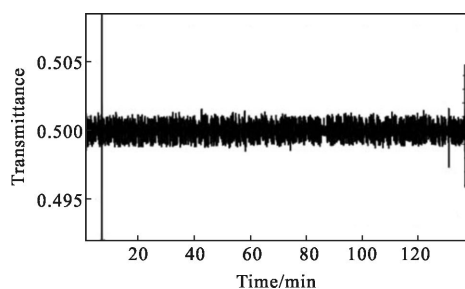


图 6 长期稳频系统的稳频结果

Fig.6 Frequency locking data of the long-term system

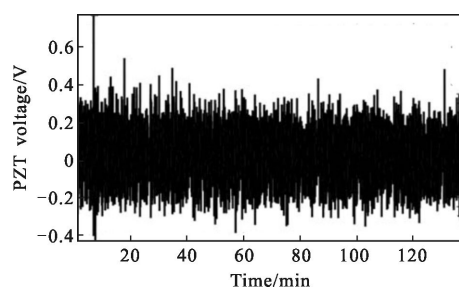


图 7 长期稳频系统稳频过程中 PZT 调节电压的变化

Fig.7 Output voltage data of PZT tuning of the long-term system

实验证明:文中设计的 532 nm 激光雷达的长期稳频系统具有良好的稳频效果,并且解决了由长时间的频率漂移导致 PZT 控制输出电压过大而引起的频率失锁的问题。实验结果表明 PZT 控制输出电压可控制在 ± 0.5 V 以内,这大大降低了系统对采集卡输出电压的要求。

4 总结

文中分析了 532 nm 多普勒激光雷达稳频系统中 PTZ 调频和温度调频的协调控制问题,建立了一套长期稳定的锁频系统。该系统的 PZT 调频以激光经过碘分子的透过率值为输入来修正激光频率的瞬时漂移,温度调频以 PZT 调频的输出电压为输入间

接修正激光频率的长期漂移。该系统取得了良好的实验结果,锁频精度可以达到 350 kHz,PZT 的输出电压可以控制在 ± 0.5 V 以内,这大大降低了系统对采集卡输出电压的要求。锁频系统稳定性得到了明显提高,可以连续运转 20 h 以上而不发生故障,并且从理论上,在器件不发生故障的情况下可以达到频率的永久锁定。为后续开展白天观测技术后激光雷达系统的长期连续运行提供保障。

参考文献:

- [1] Chanin M L, 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.
- [2] Korb C L, Gentry B M, Weng C Y. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric winds[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(21): 4202-4213.
- [3] Korb C L, Gentry B M, Li S X. Edge technique Doppler lidar wind measurements with high vertical resolution [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(24): 5976-5983.
- [4] Zhong Z Q, Sun D S, Wang B X, et al. Doppler wind lidar based on Fabry-Perot etalon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(6): 687-690. (in Chinese)
- [5] Sun D S, Li Y Y. Doppler lidar for both high and low altitude wind detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 237-242. (in Chinese)
- [6] Sun J, Feng Y T, Bai Q L, et al. Design of thermal stable Fabry-Perot etalon for wind measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 05: 1167-1173. (in Chinese)
- [7] Wang B X, Sun D S, Zhong Z Q, et al. Analysis of data processing method for Doppler wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(3): 373-376. (in Chinese)
- [8] Wu Songhua, Liu Zhishen, Liu Bingyi. Automatic laser frequency stabilization to iodine absorption line [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(4): 530-536. (in Chinese)
- [9] Liu Zhishen, Wu Songhua, Liu Bingyi. Seed injection and frequency-locked Nd: YAG laser for direct detection wind lidar [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39(3): 541-545. (in Chinese)