

# 单频纳秒脉冲激光中心频率实时监测技术

陈晓<sup>1,2</sup>, 谢小兵<sup>1,2</sup>, 谢伟<sup>1,2</sup>, 李世光<sup>1\*</sup>, 马秀华<sup>1</sup>, 朱小磊<sup>1</sup>, 刘继桥<sup>1</sup>, 陈卫标<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 基于光学外差法, 设计并搭建了一套脉冲激光中心频率实时监测系统。频率特性已知的连续光经移频后与待测的单频纳秒脉冲光发生拍频, 用光电探测器和数据采集卡记录合成光强信号, 分析拍频信号的频谱, 即可获得待测光的中心频率信息。实验用一台连续单频输出  $1.57 \mu\text{m}$  激光器作为参考光源, 采用移频、斩波、自拍频的方法对测试系统的测试速率和测试精度进行了评估, 得出该系统的响应时间为 6 ms。对于脉宽为 30 ns 左右的激光脉冲, 采样率为  $2 \text{ GSa}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 测试系统的均方根误差不超过 0.07 MHz。

**关键词** 激光器; 脉冲激光; 中心频率; 拍频; 频率稳定性

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1101003

## Real-Time Monitoring Technology for Center Frequency of Single-Frequency Nanosecond Pulse Laser

Chen Xiao<sup>1,2</sup>, Xie Xiaobing<sup>1,2</sup>, Xie Wei<sup>1,2</sup>, Li Shiguang<sup>1</sup>, Ma Xiuhua<sup>1</sup>,  
Zhu Xiaolei<sup>1</sup>, Liu Jiqiao<sup>1</sup>, Chen Weibiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A real-time monitoring system for center frequency of pulse laser is designed and built based on the optical heterodyne method. The single-frequency nanosecond pulse laser to be measured is mixed with a frequency-shifted continuous reference beam whose spectrum characteristics are known, and a light intensity signal is generated, which is then recorded by a photodetector and a data acquisition card. The center frequency information of the pulse laser can be calculated according to the spectrum of the beat signal. Measurement rate and precision of this system are evaluated through the method of frequency shifting, chopping and self-heterodyne, which uses a  $1.57 \mu\text{m}$  continuous single-frequency laser as a reference beam. Experimental results show that the response time of the system is 6 ms, and the root-mean-square error is less than 0.07 MHz when the width of laser pulse is around 30 ns and the sampling rate is  $2 \text{ GSa}\cdot\text{s}^{-1}$ .

**Key words** lasers; pulse laser; center frequency; beat frequency; frequency stability

**OCIS codes** 140.3538; 140.3425; 300.6310

## 1 引言

星载积分路径差分吸收(IPDA)激光雷达是实现全球大气二氧化碳浓度探测的重要技术手段<sup>[1]</sup>。IPDA激光雷达技术通过探测激光传播路径上目标气体对激光的吸收情况来计算路径中目标气体的平均浓度<sup>[2]</sup>。高精度测量要求激光发射源输出的光谱频率足够稳定。当选择  $1.57 \mu\text{m}$  波长时, 要求激光源输出的纳秒脉

收稿日期: 2017-06-16; 收到修改稿日期: 2017-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(61475170)、国家自然科学基金青年科学基金(61505230)

作者简介: 陈晓(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事中红外光参量振荡器方面的研究。E-mail: chenxiao@siom.ac.cn

导师简介: 朱小磊(1966—), 男, 博士, 博士生导师, 研究员, 主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: xlzhu@siom.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: sgli@siom.ac.cn

冲的频率稳定性(频率抖动的均方根值)优于 0.3 MHz<sup>[3]</sup>,这对激光源频率稳定性的测量提出了很高的要求。激光频率稳定性的测量方法可以分为相干测量和非相干测量。窄脉冲激光的线宽较宽,非相干测量方法难以同时保证测量精度和测量范围,也难以实现单脉冲激光中心频率的测量;相干测量方法一般没有这些问题,并且装置简单,能获取更丰富的频谱信息,因此在窄脉冲激光频率测量中有重要应用。相干测量方法也称为拍频测量法或光学外差法,该方法的思路是:让一束频率特性已知的参考光与待测光发生拍频,对差频信号的频谱进行分析,即可获得待测光的频谱信息<sup>[4]</sup>。

2004年,White等<sup>[5]</sup>介绍了3种拍频信号分析方法(包括傅里叶变换法、直接拟合法和电子混频法),并将这3种方法用于研究纳秒激光脉冲的啁啾。2007年,Schröder等<sup>[6]</sup>采用拍频方法测出了其自行研制的多普勒测风激光雷达发射源的频率稳定性,根据拍频系统中使用的移频器件的性能,推断出测试系统的理论误差不超过10 kHz。2009年,Wirth等<sup>[7]</sup>用拍频方法对脉宽为7.7 ns的1064 nm单频脉冲光的频率进行了测量,得出其频率稳定度为300 kHz。2011年,Fix等<sup>[8]</sup>使种子注入光参量振荡器(OPO)输出的1.57 μm脉冲和连续种子光发生拍频,以差频信号的中心频率作为误差信号,实现了OPO的稳频。2016年,Bandel等<sup>[9]</sup>对激光拍频信号中包含的信息进行了归纳,并用拍频方法分析了激光的频率噪声和短时线宽。虽然激光拍频测试技术已经有广泛的应用,但目前还没有统一的标准对拍频系统的性能进行完整描述。

本文针对自行研制的1.57 μm波段激光雷达发射源,设计并搭建了一套基于光学外差法的实时拍频监测系统,实现了纳秒激光脉冲中心频率的实时测量。理论上分析了参考光频率特性、信号采集装置、信号处理方法等对中心频率测量精度的影响。通过对一台1.57 μm连续激光器进行移频、斩波和自拍频,获得了一系列频率稳定的光学差频信号。用该信号对拍频测试系统的测试速度和精度进行了评估,得出该系统的响应时间约为6 ms。对于脉宽为30 ns左右的激光脉冲,采样率为2 GSa·s<sup>-1</sup>时,测试系统的均方根误差不超过0.07 MHz。该脉冲频率稳定性测试系统为在研激光器的相关测试工作提供了技术支撑。

## 2 光学外差法测试原理

### 2.1 脉冲光中心频率及其稳定性的拍频测量法

理论上,两束光波之间的可相干性是光学外差法测量光波频率稳定性的基础<sup>[10]</sup>。当只考虑单频纳秒脉冲激光中心频率的测量时,参考光可以选用光谱频率与待测脉冲光光谱频率接近的单频连续激光。两束光的光电场可以记为

$$E_{\text{ref}}(t) = A_{\text{ref}} \exp(\omega_{\text{ref}} t) + \text{c.c.}, \quad (1)$$

$$E_{\text{p}}(t) = A_{\text{p}}(t) \exp[\omega_{\text{p}} t + \varphi(t)] + \text{c.c.}, \quad (2)$$

式中 $A_{\text{ref}}$ 、 $A_{\text{p}}(t)$ 分别为参考光和待测光的光电场振幅, $\omega_{\text{ref}}$ 和 $\omega_{\text{p}}$ 分别为参考光和待测光的频率, $\varphi(t)$ 为待测光相对于参考光的相位波动,c.c.代表复共轭。当这两束光的偏振状态相同、传播方向平行且重合时,合成光的光强为其光电场之和的平方。该光强信号中除了包含两束光原本的光强信息外,还包含两束光的和频和差频。光电探测器(PD)的带宽有限,无法对极高的光频产生响应,因此光电探测器探测得到的光强信号是实际光强的时间平均信号<sup>[6]</sup>。对合成光的光强在时间上求平均,得到

$$\langle I \rangle \approx A_{\text{ref}}^2 + A_{\text{p}}^2(t) + A_{\text{ref}} A_{\text{p}}(t) \cos[(\omega_{\text{p}} - \omega_{\text{ref}})t + \varphi(t)], \quad (3)$$

式中第一项代表了参考光的光强;第二项代表了待测脉冲光强度包络;第三项是这两束光的差频,即拍频信号。和频信号的平均值为零,且频率很高,现有探测器无法对激光和频信号产生响应;差频信号的平均值同样为零,但其频率可以很低,当该频率低于光电探测器的截止频率时,差频信号就能被探测到。若参考光频率已知且非常稳定,差频信号的中心频率及其稳定性将能够反映待测脉冲光的中心频率及其稳定性。

基于上述原理,模拟了理想单频连续光和理想单频脉冲光的拍频过程,合成后的平均光强信号如图1(a)所示,其脉冲形状为高斯型,脉宽为20 ns,与连续光的频差为400 MHz。根据 $\langle I \rangle$ 可以找出差频信号的中心频率,但需要先将差频信号从 $\langle I \rangle$ 中分离出来。直流成分 $A_{\text{ref}}^2$ 可以从信号中直接减去; $A_{\text{p}}^2(t)$ 为低频信号,其频谱具有一定宽度; $A_{\text{ref}} A_{\text{p}}(t) \cos[(\omega_{\text{p}} - \omega_{\text{ref}})t + \varphi(t)]$ 的中心频率由两束光的频差决定。若频差足够大,脉冲光强度包络的频谱和差频信号的频谱将在频域中被有效分离开,如图1(b)所示,图中给出了 $\langle I \rangle$ 的频谱(已减去直流成分 $A_{\text{ref}}^2$ ),零频处的峰来自 $A_{\text{p}}^2(t)$ ,400 MHz处的峰来自 $A_{\text{ref}} A_{\text{p}}(t) \cos[(\omega_{\text{p}} - \omega_{\text{ref}})t +$

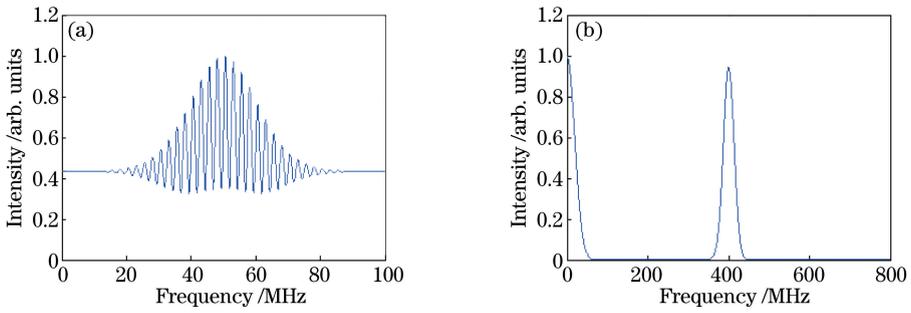


图 1 (a)合成后的平均光强信号;(b)合成后的平均光强信号(已减去直流成分  $A_{ref}^2$ )

Fig. 1 (a) Average light intensity signal after combination; (b) average light intensity signal after combination (without direct current component  $A_{ref}^2$ )

$\varphi(t)$ ],此时可以用高通滤波器将低频信号滤除,从而得到差频信号。

从差频信号中提取出中心频率的方法包括快速傅里叶变换(FFT)方法、直接拟合法和电子混频法等<sup>[5]</sup>,相关研究表明,这几种方法并没有严格的优劣之分。对于脉冲光与连续光的拍频过程,FFT方法的优点在于可以直接在频域中分析差频信号的频谱,不需要对低频成分进行处理,中心频率计算过程比较直观,而且可以同时从频谱中求得激光线宽。这里采用FFT方法对待测脉冲光的中心频率进行计算,实时的FFT过程可以通过频谱仪或计算机来实现<sup>[11]</sup>。

### 2.2 影响中心频率测量精度的因素

影响中心频率测量精度的因素主要包括参考光频率特性、信号采集装置和信号处理方法。

拍频方法测量的是待测光与参考光的频差,如果参考光自身的频率有波动,将直接影响测量结果的可靠性。当参考光的频率稳定性比待测光高一个数量级时,可以认为测得的频差抖动全由待测光的频率抖动产生。考虑到待测光为纳秒脉冲,参考光的频率还需要在纳秒尺度内足够稳定。参考光与待测光之间频差范围的选取也会影响测量结果的可靠性。频差较小时,合成的平均光强信号中脉冲光强度包络的频谱与差频信号的频谱会在频域中交叠<sup>[4]</sup>。由于差频信号的频谱受到来自脉冲光强度包络的影响,因此中心频率测量值不再准确。此时可以用声光移频器(AOM)对其中一束光进行移频,引入额外的频差,从而保证差频信号不受低频成分的干扰。一般而言,待测光的脉宽越窄,其在频域中占据的宽度就越大,所需要的AOM移频量也越大,同时移频量的选取还受限于探测器和采集卡的带宽。

拍频信号采集装置中电噪声的存在会引入额外的频率成分,导致中心频率的测量精度降低。根据奈奎斯特采样定理,采样频率要大于信号最高频率的2倍,才能完整地保留原始信号携带的信息。在满足采样定理的基础上,提高采样率能够降低噪声对差频信号频谱的影响,从而可提高中心频率的测量精度。

采用不同的算法对同一组信号进行处理,得到的结果会稍有差异。用FFT方法获得差频信号的频谱后,可以将频谱最大值对应的频率作为其中心频率(最大值法),也可以将频谱的几何中心对应的频率作为其中心频率(重心法)<sup>[12]</sup>。仅从理论上难以比较两种算法的优劣,后面的性能测试对这两种算法的性能进行了简单比较。

## 3 中心频率实时监测系统

自行研制的  $1.57 \mu\text{m}$  波段单频脉冲激光源是通过种子注入单频脉冲OPO来实现的。所用种子激光器为连续单频分布式反馈激光器<sup>[13]</sup>,种子光的频率稳定度为  $0.14 \text{ MHz}$ 。OPO采用四镜环形腔结构,其中一个腔镜安装在压电陶瓷(PZT)上,通过改变施加在PZT上的电压可以改变腔长。采用谐振探测-峰值保持技术,可以实现OPO腔长与种子光频率的匹配,从而获得良好的种子注入效果<sup>[1]</sup>。OPO输出脉冲的重复频率为  $20 \text{ Hz}$ ,脉宽约为  $28 \text{ ns}$ ,输出的  $1.57 \mu\text{m}$  脉冲与种子光频率基本一致。

为了测量所述激光器的频率稳定性,基于拍频测试原理,设计并搭建了一套脉冲激光中心频率实时监测系统,实验装置如图2所示。该系统包含光纤分束器、合束器、AOM、PD、数据采集卡(DAQ)和计算机等部分。

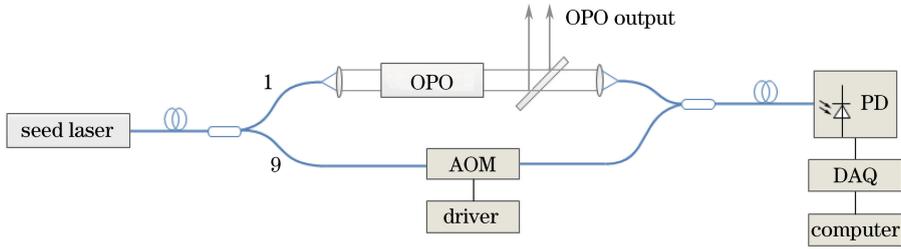


图 2 脉冲激光中心频率实时监测系统实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of real-time monitoring system for center frequency of pulse laser

1.57  $\mu\text{m}$  种子激光器具有良好的频率稳定性,可以作为拍频测试过程的参考光,但 OPO 输出频率与种子光基本一致,因此需要用 AOM 对其中一束光进行移频。实验所用的 AOM(IPF-400-40-1550-2FP 型, Brimrose 公司,美国)采用光纤耦合,标称的移频量为 400 MHz,移频量的稳定度为 6 kHz。AOM 工作在连续调制状态下,目的只是对连续参考光进行移频。种子激光器的输出光被 1:9 的单模保偏光纤分束器分成两路,1 端光束入射到 OPO 中,用于实现种子注入;9 端光束经过 AOM 之后被移频 400 MHz,然后作为参考光入射到 1:1 单模保偏光纤合束器的一个输入端。OPO 脉冲光经过 45°高反镜,利用能量计对反射光进行测试,透射光经聚焦镜耦合至单模保偏光纤,并作为待测光入射到合束器的另一输入端。合束器的输出直接接到 PD(带宽为 5 GHz),利用美国 NI 公司生产的 PCI-5154 型 DAQ(8 位,采样率可选 1  $\text{GSa}\cdot\text{s}^{-1}$  和 2  $\text{GSa}\cdot\text{s}^{-1}$ )采集探测器输出的电压信号,将电压信号输送到计算机中,并用 Labview 进行实时处理<sup>[14]</sup>。

拍频信号处理过程包含以下几个步骤:1) 从 DAQ 中读取原始光强信号并进行预处理,去除信号中的直流成分并截取信号的有效部分;2) 对预处理后的信号补零并进行 FFT( $2^{14}$  点),得到其频谱;3) 根据差频信号的频谱求出其中心频率。只截取信号的有效部分进行分析,可以在一定程度上减小噪声对计算过程的影响。补零的目的是提高 FFT 所得频谱的分辨率,以体现频谱的细节。获得差频信号的频谱后,可以分别用最大值法和重心法对中心频率进行计算。用 Labview 程序可以实现上述计算过程,并将中心频率的计算结果实时显示出来(图 3),从而为频率稳定性的测量提供了方便。

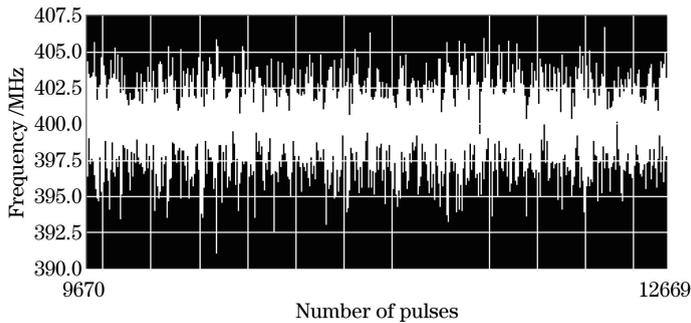


图 3 中心频率计算结果的实时显示

Fig. 3 Real-time display of calculation result of center frequency

## 4 拍频监测系统的性能

### 4.1 性能评估方案

为了对上述拍频监测系统的性能进行评估,搭建了图 4 所示的性能测试系统,所采用的评估方案可以归纳为移频、斩波、自拍频 3 个步骤。

1.57  $\mu\text{m}$  种子激光器的输出被 1:9 单模保偏光纤分束器分成两路:1 端光束作为连续参考光,直接接入到 1:1 单模保偏光纤合束器的一个输入端;9 端光束经过 AOM,作为信号光输入到合束器的另一输入端。用一台信号发生器(DG645 型,斯坦福公司,美国)产生脉冲信号,并对 AOM 进行调制,AOM 可以在移频的同时对连续光进行斩波,移频量的稳定度在 kHz 量级。在参考光路中对 AOM 引入的延时进行补偿,可以

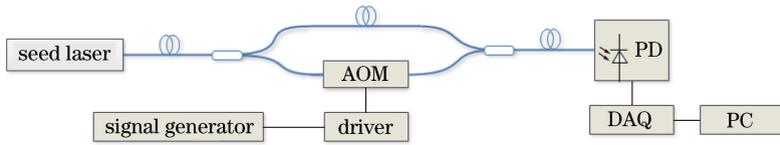


图 4 拍频测试系统性能评估方案

Fig. 4 Test program of performance for beat frequency measurement system

消除种子光频率抖动对信号光与参考光之间频差的影响。之后连续参考光与由其移频并斩波得到的脉冲光发生拍频,合成的光强信号如图 5 所示(采样率为  $2 \text{ GSa}\cdot\text{s}^{-1}$ , AOM 斩波得到的脉冲宽度为  $30 \text{ ns}$ )。

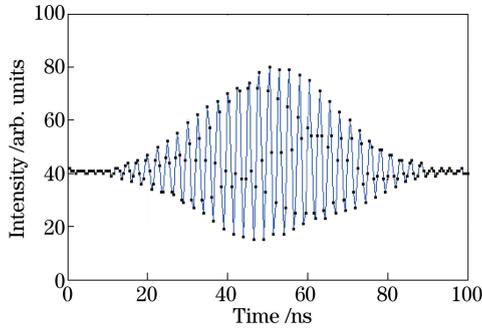


图 5 移频、斩波、自拍频过程合成的平均光强信号

Fig. 5 Average light intensity of combined beam generated by frequency shifting, chopping and self-heterodyne

合成后的平均光强信号中包含的差频成分具有很高的频率稳定性(由 AOM 移频量稳定性决定, kHz 量级),其均方根值记为  $\sigma_1$ 。用后续信号采集和数据处理装置对该信号进行处理时会引入随机误差,测得的频率稳定度与  $\sigma_1$  不同,记为  $\sigma_2$ 。实际的  $\sigma_1$  相比  $\sigma_2$  可忽略不计,因此  $\sigma_2$  代表了测试系统的均方根误差。

#### 4.2 系统性能分析

用最大值法提取  $10^4$  个上述信号的中心频率,并作出其频数分布图,如图 6 所示。计算得到信号中差频成分的中心频率稳定度为  $0.07 \text{ MHz}$ 。由前面的讨论可知,此时测试系统的均方根误差不超过  $0.07 \text{ MHz}$ ,并且测量误差呈高斯分布。

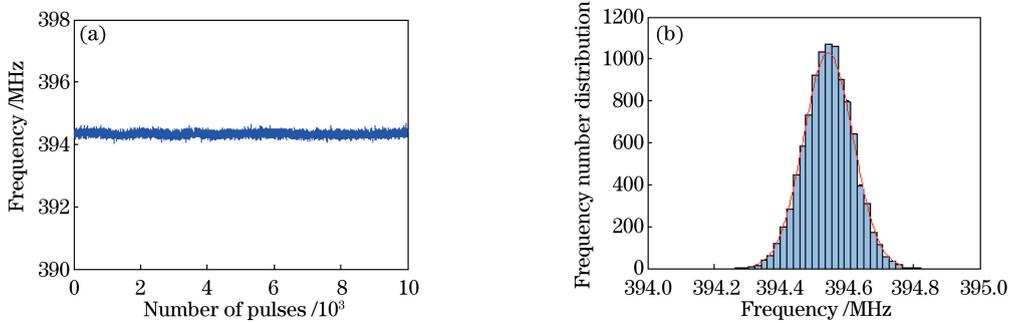


图 6 采样率为  $2 \text{ GSa}\cdot\text{s}^{-1}$ 、采用最大值法时的性能测试结果。(a)  $10^4$  个拍频信号的中心频率;(b)中心频率的频数分布图

Fig. 6 Results of measurement by maximum method with sampling rate of  $2 \text{ GSa}\cdot\text{s}^{-1}$ .

(a) Center frequency of  $10^4$  pulses; (b) frequency number distribution of center frequency

注意到该信号中差频成分的中心频率在  $394.5 \text{ MHz}$  左右,与 AOM 标称的  $400 \text{ MHz}$  移频量有  $5.5 \text{ MHz}$  的偏差。为了证明这一偏差并非由信号处理过程引入,进行了如下实验:使图 4 中 AOM 工作在连续状态下,此时合束器输出的是连续光与连续光的合成光强信号。从中截取长度为  $60 \text{ ns}$  的信号进行分析,如图 7(a)所示;截取  $10^4$  组这样的数据,采用与前面相同的方法求出其中中心频率,得到的结果如图 7(b)所示。可以看到此时差频信号的中心频率为  $400 \text{ MHz}$ 。该结果表明  $5.5 \text{ MHz}$  的偏差与信号处理过程无关,而是由 AOM 工作在脉冲调制状态下导致的。

将脉冲的出光时刻记为  $t_1$ ,求出其中心频率的时刻记为  $t_2$ ,中间的时间间隔  $\Delta t = t_2 - t_1$ 。若下一个脉冲

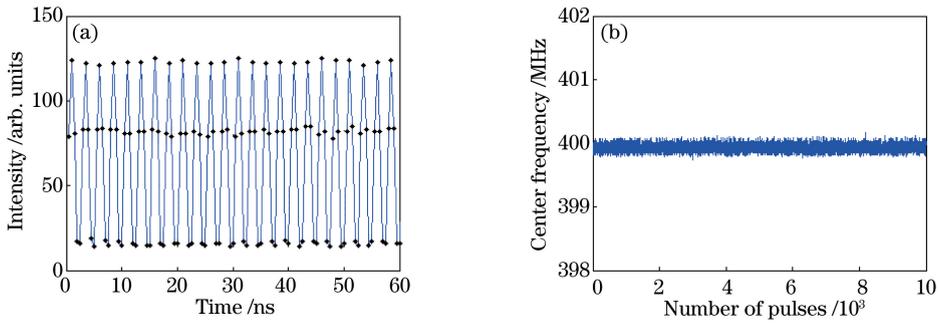


图 7 连续光拍频测量结果。(a)连续光拍频信号;(b)连续光拍频信号的中心频率

Fig. 7 Measurement results of continuous laser beat frequency. (a) Beat frequency signal of continuous laser; (b) center frequency of beat frequency signal of continuous laser

在  $t_1$  和  $t_2$  时刻之间到来,该脉冲将无法被探测到。因此只有脉冲时间间隔大于  $\Delta t$ ,图 3 中测试面板的数据更新速率才会等于脉冲的重复频率,即实现实时测量。使测量结果更新速率等于脉冲重复频率的最小脉冲时间间隔,脉冲时间间隔就等于  $\Delta t$ 。利用信号发生器改变脉冲间隔,可以得到  $\Delta t$  的值约为 6 ms。

### 4.3 其他条件下的系统性能

对不同采样率、不同数据处理方法下的中心频率测量误差都进行了比较,结果发现:采样率为  $2 \text{ GSa}\cdot\text{s}^{-1}$  时,采用重心法和最大值法的系统均方根误差不超过 0.07 MHz;采样率为  $1 \text{ GSa}\cdot\text{s}^{-1}$  时,两种方法的均方根误差不超过 0.09 MHz。这几种情况下,系统测量一个脉冲的中心频率所需的时间均为 6 ms。在采样率分别为  $2 \text{ GSa}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $1 \text{ GSa}\cdot\text{s}^{-1}$  的情况下,对计算得到的差频信号的归一化频谱进行了比较,如图 8 所示。由图可以看出, $2 \text{ GSa}\cdot\text{s}^{-1}$  采样率下噪声的频谱能量低于  $1 \text{ GSa}\cdot\text{s}^{-1}$  采样率时的噪声频谱能量。因此,提高采样率能够降低噪声对差频信号的频谱的影响,从而提高中心频率测量的精度。

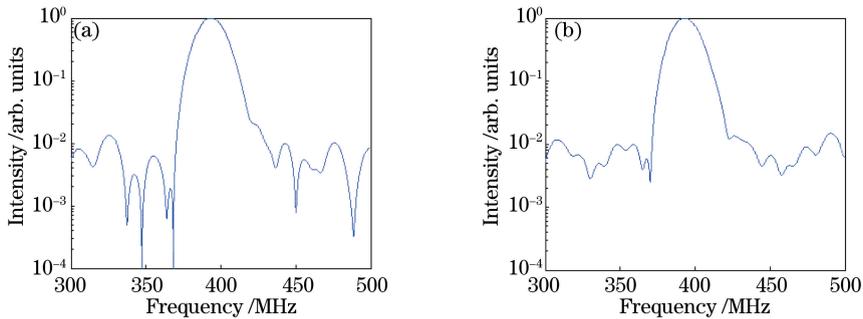


图 8 不同采样率下计算得到的拍频信号的频谱。(a)  $2 \text{ GSa}\cdot\text{s}^{-1}$  采样率;(b)  $1 \text{ GS}\cdot\text{s}^{-1}$  采样率

Fig. 8 Spectra of the beat frequency signal under different sampling rates. (a) Sampling rate is  $2 \text{ GSa}\cdot\text{s}^{-1}$ ; (b) sampling rate is  $1 \text{ GS}\cdot\text{s}^{-1}$

对不同脉冲宽度下的测量误差也进行了比较。结果发现,脉冲宽度范围为 28~32 ns 时,用上述方法求出的系统均方根误差都不超过 0.07 MHz(采样率为  $2 \text{ GSa}\cdot\text{s}^{-1}$ );脉宽略微减小或增大,不会对测试系统的精度产生显著影响。

## 5 结 论

研制了一套单频纳秒脉冲激光的中心频率的实时监测系统,并采用移频、斩波、自拍频的方法对其性能进行了评估,为相关拍频系统的搭建提供了参考。该系统测试单个脉冲所需的时间为 6 ms;对于脉宽为 30 ns 左右的单频激光脉冲,采样率为  $2 \text{ GSa}\cdot\text{s}^{-1}$  时,测试系统的均方根误差不超过 0.07 MHz。探究了不同的系统参数对其性能的影响,结果表明:提高采样率能够减小噪声对差频信号频谱的影响,从而提高中心频率测量的精度;在采用 FFT 方法的基础上,分别用重心法和最大值法提取中心频率,系统的均方根误差没有明显差别。该系统的测试精度能够满足  $1.57 \mu\text{m}$  波段 IPDA 激光雷达光源的测量需求,也能应用于其他波段

(如2  $\mu\text{m}$ )单频脉冲激光中心频率的测量。

## 参 考 文 献

- [1] Li S G, Li H H, Ma X H, *et al.* High-efficiency nanosecond optical parametric oscillator with the stable ring configuration[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(10): 1610-1614.
- [2] Fix A, Matthey R, Amediek A, *et al.* Investigations on frequency and energy references for a space-borne integrated path differential absorption lidar[C]. *International Conference on Space Optics*, 2014.
- [3] Ehret G, Kiemle C, Wirth M, *et al.* Space-borne remote sensing of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O by integrated path differential absorption lidar: A sensitivity analysis[J]. *Applied Physics B*, 2008, 90(3/4): 593-608.
- [4] Fee M S, Danzmann K, Chu S. Optical heterodyne measurement of pulsed lasers: Toward high-precision pulsed spectroscopy[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(7): 4911-4924.
- [5] White R T, He Y B, Orr B J, *et al.* Control of frequency chirp in nanosecond-pulsed laser spectroscopy. 1. Optical-heterodyne chirp analysis techniques[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, 21(9): 1577-1585.
- [6] Schröder T, Lemmerz C, Reitebuch O, *et al.* Frequency jitter and spectral width of an injection-seeded Q-switched Nd:YAG laser for a Doppler wind lidar[J]. *Applied Physics B*, 2007, 87(3): 437-444.
- [7] Wirth M, Fix A, Mahnke P, *et al.* The airborne multi-wavelength water vapor differential absorption lidar WALES: System design and performance[J]. *Applied Physics B*, 2009, 96(1): 201-213.
- [8] Fix A, Büdenbender C, Wirth M, *et al.* Optical parametric oscillators and amplifiers for airborne and spaceborne active remote sensing of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>[C]. *SPIE*, 2011, 8182: 818206.
- [9] Bandel N V, Myara M, Sellahi M, *et al.* Time-dependent laser linewidth: Beat-note digital acquisition and numerical analysis[J]. *Optics Express*, 2016, 24(24): 27961-27978.
- [10] 蓝信钜. 激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 244-247.
- [11] Wang Xu, Zhang Haojie, Wen Quan, *et al.* A stress fiber sensor based on laser beat frequency[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(8): 0801011.  
王旭, 张豪杰, 温泉, 等. 一种利用激光拍频实现应力测量的传感装置[J]. *中国激光*, 2016, 43(8): 0801011.
- [12] Diao W F, Zhang X, Liu J Q, *et al.* All fiber pulsed coherent lidar development for wind profiles measurements in boundary layers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(7): 072801.
- [13] Du J, Sun Y G, Chen D J, *et al.* Frequency-stabilized laser system at 1572 nm for space-borne CO<sub>2</sub> detection LIDAR [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(3): 031401.
- [14] Du Jun, Li Shiming, Zhao Weijiang, *et al.* Measuring method of virtual digital phase locking for phase modulation laser Doppler frequency parameter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s1): s112001.  
杜军, 李世明, 赵卫疆, 等. 相位调制激光多普勒鉴频参量的虚拟数字锁相测量方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(s1): s112001.