

光学频率合成器的自动化控制研究

陈学智, 姚远, 蒋燕义*, 马龙生

华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

摘要 光学频率合成器可在激光波长宽调谐范围内按指定的频率高精度地输出赫兹线宽稳频激光。在实现 700~990 nm 光学频率合成器原理验证的基础上, 研究了光学频率合成器自动化控制的方法。通过实时比较波长计读数与目标输出光频的差别, 自动设定输出激光的波长和数字可控光栅转台, 自动获得输出激光与飞秒光梳之间的拍频信号并进行自动信号处理, 以获得输出激光与参考激光之间的锁相控制信号。采用计算机控制后, 可在 1 min 内获得输出激光频率控制误差信号, 这为实现全自动的光学频率合成器打下基础。

关键词 激光光学; 光学频率合成器; 自动化控制; 飞秒光梳; 激光稳频

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0714005

Automatic Control of Optical Frequency Synthesizer

Chen Xuezhi, Yao Yuan, Jiang Yanyi*, Ma Longsheng

State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract An optical frequency synthesizer can output single-frequency Hz-linewidth laser with high frequency stability at a specified optical frequency within a wide spectral range. Based on a prototype of optical frequency synthesizer at 700-990 nm, we make a step towards its automatic control. The wavelength of output laser and a motorized rotation stage of a grating are set automatically after comparing the reading of a wavemeter with the target output frequency. The beat frequency signal between the output laser and femtosecond optical comb can be obtained, and automatic signal processing can be realized, obtaining phase-locked control signal between the output laser and reference laser. An error signal for laser frequency control can be obtained within one minute. This study lays a foundation for the realizing the fully automatic optical frequency synthesizer.

Key words laser optics; optical frequency synthesizer; automatic control; femtosecond optical comb; laser frequency stabilization

OCIS codes 140.3600; 300.6360; 120.4800; 140.4050

1 引 言

射频频率(RF)合成器能在任意指定的微波频率处输出频率稳定的正弦波信号。目前, 射频频率合成器已广泛应用于科学研究与高新技术应用中。在光波段, 由于光的频率比微波的频率高 4 个数量级, 电子元器件无法响应如此高的频率, 因此光波段的频率合成器(简称光学频率合成器)很难实现。光学频率合成器可以在宽光谱范围内的任意指定频率处输出低噪声、高频率稳定度的单频激光, 它是开展精密光谱与精密测量的关键光源。目前, 光钟的频率不稳定度和频率不确定度均已达到 10^{-18} ^[1-5], 已超越目前的时间频率基准-铯喷泉钟^[6]。光钟能提

供前所未有的频率准确度和稳定度, 将使物理常数随时间变化与否的探索、基本物理理论验证、暗物质搜寻、引力波探测、超精密光谱探测等研究成为可能^[2,4,7-12], 还可能替代现有的时间频率标准^[13], 从而影响科学技术领域的各个方面。因此, 光钟的上述应用都需要高精度的光学频率合成器, 它能将特定频率的光钟信号转换为任意所需要的光频或者射频波段, 并且在转换过程中不会破坏光钟的频率稳定性和准确度。

飞秒光梳的诞生为光学频率合成器的实现提供了基础^[14-15]。通过精确控制飞秒光梳的载波包络偏移频率(f_0)和重复频率(f_r), 可对非常宽的光谱范围内的每个梳齿的频率进行相干控制, 从而使宽波

收稿日期: 2019-02-25; 修回日期: 2019-04-04; 录用日期: 2019-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(91636214, 11822402, 11654004, 11804094)、科技部重点研发计划(2017YFA0304403)

* E-mail: yyjiang@phy.ecnu.edu.cn

段范围内的光波甚至微波进行相干连接^[16-17]。飞秒光梳不能直接作为光学频率合成器的输出信号,这是因为飞秒光梳所有的频率成分都在同一束激光中,且每个频率成分的功率非常小,在 1 nW~1 μW 量级。为了克服此弱点,需要一台波长调谐范围大且输出功率大的单频激光器,通过飞秒光梳将该单频激光与参考激光(如光钟)进行频率相干连接,使该单频激光继承参考激光的相干性和频率精度,最终实现能覆盖一定光波长范围的光学频率合成^[18-20]。

Jost 等^[18] 利用飞秒光梳,将碘分子稳频的 Nd:YAG 激光的频率稳定度(5×10^{-14} , 平均时间为 1 s)传递给一台半导体连续(CW)激光器,实现了 778 nm 光波长附近的任意光频合成和调谐,输出激光线宽在 100 kHz 量级。Yao 等^[19] 利用钛宝石飞秒光梳将一台光学参考腔稳频的 Nd:YAG 激光的频率稳定度(1×10^{-15} , 平均时间为 1 s)和 0.6 Hz 线宽特性传递给一台高功率、连续可调谐钛宝石单频激光器,实现了 700~990 nm 波长范围的光学频率合成器,并证明输出激光的频率不稳定性达到 1×10^{-15} , 线宽约为 1 Hz, 功率大于 0.5 W, 光频合成误差在 10^{-21} 量级。Spencer 等^[20] 演示了芯片型光学频率合成器,并利用芯片上的两种不同重复频率的光梳,将微波频率标准 10 MHz 信号向芯片型 III-V/Si 可调谐激光(波长为 1.5 μm)传递,输出激光的频率调谐范围为 4 THz, 频率分辨率达 1 Hz, 频率合成误差优于 7.7×10^{-15} 。

上述光学频率合成器研究侧重调谐范围、精度、小型化,却很少关注光学频率合成器的自动化程度。本文在 700~990 nm 波长范围的光学频率合成器的基础上,为了减少光学频率合成中人为的设备调整、仪器设置与计算等过程,对原有的光路及信号处理过程加以调整:1)利用计算机读取波长计读数,自动调节光学频率合成器输出激光的频率,使之接近目标输出光频;2)根据目标光频,由计算机控制光栅转动平台,设定光栅入射角度,使输出激光与其相邻的光梳梳齿一起进入探测器,从而获得高信噪比的输出激光与光梳的拍频信号;3)根据该拍频信号,由计算机控制输出激光的频率,使之精细调节至目标频率;4)通过计算机程序计算和设置信号处理系统中的数字频率合成器(DDS)的分频数和射频信号发生器的输出频率,最终实现在计算机中输入目标光频,从而快速获得输出激光频率控制信号。

2 基本工作原理

光学频率合成器的原理示意图如图 1(a)所示,通过比较波长计的测量值与目标输出光频 ν_t 的差异,由计算机自动调节输出激光的频率(ν_{out}),使其逐步接近目标光频, ν_{out} 被光学分频器精确地设定到 ν_t 。光学分频器的作用使输出激光的特性继承参考激光,且频率值满足 $\nu_{out} = \nu_t = \nu_{ref}/R$ (R 为分频比,由目标光频与参考激光频率 ν_{ref} 计算得到)。

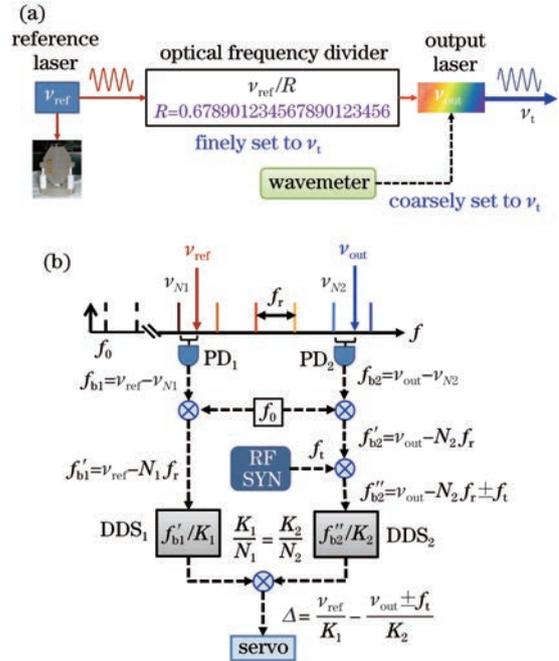


图 1 光学频率合成原理图。(a)光学频率合成器示意图;
(b)高精度光学分频器原理图

Fig. 1 Schematic of optical frequency synthesis.

(a) Diagram of optical frequency synthesizer;

(b) diagram of optical frequency divider

利用飞秒光梳可实现频率间隔很大的两个激光信号之间的相干连接,如光学频率合成器中的输出激光 ν_{out} 和参考激光 ν_{ref} 。实现相干连接的方法主要有两种:

1) 将光梳梳齿锁相到参考激光上,使参考激光的特性传递到所有光梳梳齿上,再将输出激光锁相到与其相近的光梳梳齿上,实现输出激光与参考激光之间的频率相干连接^[16,21]。利用该方法实现频率传递时,会受到两次光学锁相过程产生的噪声的影响。

2) 在光梳不锁定的情况下,让飞秒光梳作为连接 ν_{out} 和 ν_{ref} 的频率桥梁,分别获得 ν_{out} 和 ν_{ref} 与相邻梳齿的拍频信号。通过信号混频和合适的分频后,可直接获得输出激光与参考激光之间的频率误差信

号,该信号与光梳的零频和重复频率无关,从而可将输出激光锁相于参考激光,该方法称为传输振荡器技术^[22-23]。从原理上分析,传输振荡器技术可摆脱光梳的频率噪声,而实际情况中受电子器件响应时间的影响,无法完全消除光梳频率噪声。

本文运用的高精度光学分频器是将上述两种方法结合:将飞秒光梳锁定于参考激光,大大减小光梳频率噪声;通过传输振荡器技术将输出激光的频率锁相于参考激光^[24],大大降低光频相干传递过程中光梳频率噪声的影响。

高精度光学分频器的工作原理如图 1(b)所示。在光梳中,某一个梳齿的频率可表示为 $\nu_N = Nf_r \pm f_0$ (N 为整数,代表光梳梳齿的序号; f_0 为光梳零频信号)。光电探测器 (PD₁) 测得参考激光与其相邻光梳梳齿 (频率为 ν_{N_1}) 的拍频信号 f_{b1} ,将 f_{b1} 和 f_0 分别与射频信号源的输出信号进行鉴相,通过控制飞秒锁模脉冲激光的腔长(控制装在压电陶瓷上的激光腔镜位置)和腔内色散(抽运源功率),使光梳锁相于参考激光。同时 PD₂ 测得输出激光与其相邻梳齿 (频率为 ν_{N_2}) 的拍频信号 f_{b2} 。 f_{b1} 和 f_{b2} 可分别表示为

$$f_{b1} = \nu_{\text{ref}} - (N_1 f_r \pm f_0), \quad (1)$$

$$f_{b2} = \nu_{\text{out}} - (N_2 f_r \pm f_0), \quad (2)$$

式中: N_1 为与参考光相邻的光梳梳齿序号; N_2 为与输出光相邻的光梳梳齿序号。

将拍频信号 f_{b1} 和 f_{b2} 分别送入双平衡混频器 (DBM),二者与 f_0 混频后,消去 f_0 ,得到混频后的信号 f'_{b1} 和 f'_{b2} 分别为

$$f'_{b1} = \nu_{\text{ref}} - N_1 f_r, \quad (3)$$

$$f'_{b2} = \nu_{\text{out}} - N_2 f_r. \quad (4)$$

为了实现输出光频 ν_{out} 的连续可调,将 f'_{b2} 与射频信号 f_t 进行混频,得到混频信号 f''_{b2} :

$$f''_{b2} = \nu_{\text{out}} - N_2 f_r \pm f_t. \quad (5)$$

为了消除光梳重复频率 f_r 对光频相干传递的影响,利用两个 DDS 分别对 f'_{b1} 和 f''_{b2} 进行分频,分频数分别为 K_1 和 K_2 ,并保证分频数满足 $N_1/K_1 = N_2/K_2$ 。两个 DDS 的输出信号分别为

$$f_{\text{DDS}_1} = (\nu_{\text{ref}} - N_1 f_r)/K_1, \quad (6)$$

$$f_{\text{DDS}_2} = (\nu_{\text{out}} - N_2 f_r \pm f_t)/K_2. \quad (7)$$

将 DDS 的输出信号送入双平衡混频器进行混频鉴相,通过低通滤波器滤波后得到输出激光频率锁定的误差信号为

$$\Delta = \frac{\nu_{\text{ref}}}{K_1} - \frac{\nu_{\text{out}} \pm f_t}{K_2}. \quad (8)$$

由(8)式可知,该误差信号与 f_0 和 f_r 无关,因而可有效地消除光梳频率噪声的影响,该误差信号直接反映了输入参考激光与光学频率合成器输出激光之间的相对频率变化。将此误差信号送入伺服系统,对输出激光频率进行控制,可得

$$\nu_{\text{out}} = \frac{K_2}{K_1} \nu_{\text{ref}} \pm f_t. \quad (9)$$

当 f_t 信号是由参考激光在同一光梳下转换时, $f_t = \nu_{\text{ref}}/k$ (k 为下转换合成系数),输出激光的频率完全由参考激光决定。此时,参考激光的线宽和频率稳定度特性被相干传递到光学频率合成器的输出激光。如果不加 f_t ,输出激光仍然可锁定在参考激光上,由于需要满足条件 $N_1/K_1 = N_2/K_2$,因此输出激光的频率只能为分立值(取决于 N_1 和 N_2 的比值)。因此,通过加入射频调谐信号 f_t ,可实现光学频率合成器输出激光频率的连续可调。

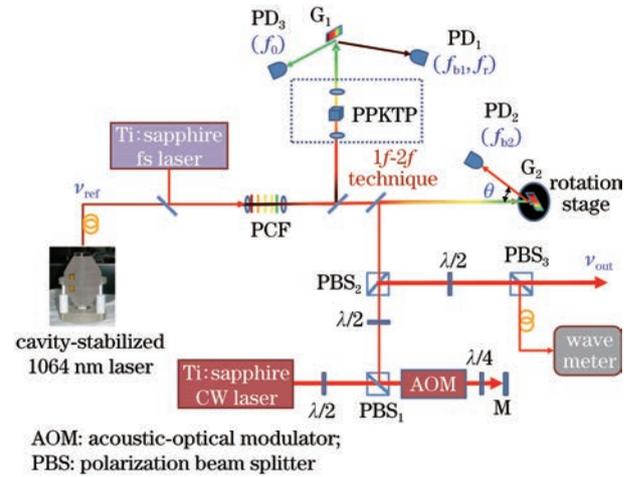


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup diagram

光学频率合成器的参考激光由一台 Nd:YAG 激光器(1064 nm)产生,该激光的频率被精确锁定在光学参考腔的谐振频率上,参考腔的长度稳定度在很大程度上决定了激光频率稳定度。因此参考腔的支撑方式和外围热屏蔽层都经过特殊设计,并采取精密温控、隔振、隔声等措施,使得环境振动和温度起伏对参考腔腔长影响最小^[25]。稳频后,该参考激光的频率不稳定度为 1.2×10^{-15} (平均时间为 1 s),线宽为 0.6 Hz,在 1 Hz 傅里叶频率处的频率噪声为 $0.3 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[26]。飞秒光梳脉冲是由重复频率为 800 MHz 的钛宝石飞秒锁模激光器产生,中心波长为 800 nm,平均功率为 600 mW。飞秒脉冲激光经过光子晶体光纤(PCF),其光谱被展宽成一个倍频程(覆盖 532~1064 nm),再经过共轴自参考

$1f \sim 2f$ 干涉仪后^[27],在探测器 PD₃上获得光梳零频信号 f_0 。为了获得高信噪比的参考激光与光梳之间的拍频信号,将参考激光与飞秒锁模脉冲一同耦合入光纤晶体光纤,从而在参考激光周围产生交叉相位调制型光梳,以增加与光梳拍频的梳齿个数^[21],在探测器 PD₁上获得高信噪比的参考激光与光梳的拍频信号 f_{b1} 以及光梳的重复频率信号 f_r 。光学频率合成器的输出激光是由一台波长在 700~1000 nm 范围内连续可调谐的钛宝石单频激光器(SolsTis 激光器, M²公司)产生,该激光的输出功率大于 1 W。为了实现对输出激光频率的快速控制,输出的单频激光两次经过一个声光调制器(AOM)。之后,其一级衍射光被分成 3 路:1 路送至光梳,与光谱展宽后的光梳激光共同经过光栅(G₂)后,在探测器 PD₂上得到与光梳的拍频信号 f_{b2} ,光栅的作用是滤除光梳中的其他光谱成分,提高 f_{b2} 信号的信噪比;1 路送至波长计,根据波长计的读数粗调钛宝石连续激光器的波长,光频调节精度为 60 MHz;1 路作为光学频率合成器的输出光,其功率大于 0.5 W。

3 自动化控制

在实现 700~990 nm 光学频率合成器原理验证的基础上,研究了光学频率合成器自动化控制的方法。针对各项需要人为调整的步骤,逐步实现计算机控制,其中包括:

1) 研究人员根据光学频率合成器的目标波长或频率,调整钛宝石连续激光器的各个部件,从而将其输出波长调至目标波长附近。将上述钛宝石连续激光器的波长粗调谐从人为调整改成计算机控制,波长计通过与计算机相连实现激光波长数据通信,从而通过计算机控制将输出激光的频率调节至目标波长(精度取决于波长计的精度)。

2) 每当改变目标光频时,需人为调整光栅的角度和探测器的位置,使钛宝石连续激光与飞秒光梳入射到探测器上进行探测。本研究作以下改进:将光栅放置在数字控制的转台上,计算机根据目标波长可以计算出马达转动的角度,使与输出激光相邻的光梳梳齿和部分输出激光同时入射到探测器 PD₂中,从而在探测器 PD₂位置固定的情况下获得高信噪比的 f_{b2} 。

3) 人为读取光梳零频 f_0 、重复频率 f_r 、参考激光与光梳拍频 f_{b1} ,根据输出激光的目标频率 ν_i 计算出光梳梳齿序数 N_1 和 N_2 、DDS 分频数 K_1 和 K_2 及射频(RF)信号源的输出频率 f_1 ,并设置 DDS 分

频数和射频信号源的输出频率,调节各个滤波器的中心频率(机械转盘),从而获得激光锁频信号。将上述一系列人为计算和仪器设置改成计算机读取计数器测得的 f_0 、 f_r 、 f_{b1} 的数值,自动计算出 N_1 、 N_2 、 K_1 、 K_2 和 f_1 ,并自动设置 DDS 的分频数和射频信号源的输出频率。

上述每一个单元实现自动控制后,用 Labview 编写频率合成器的自动化控制程序,程序流程图如图 3 所示。

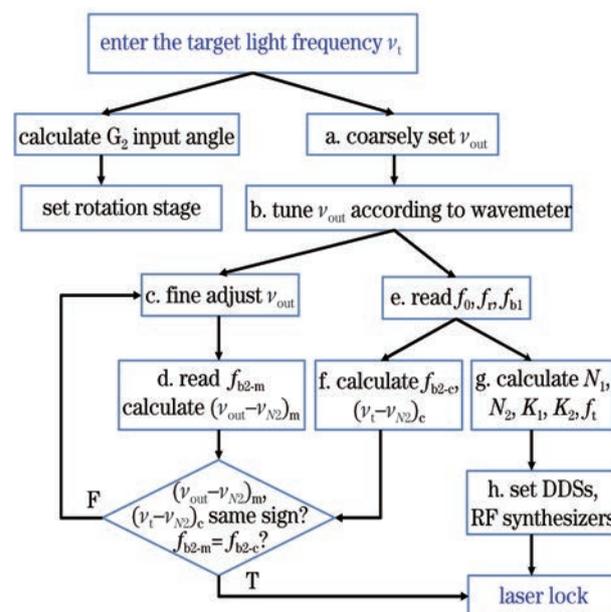


图 3 自动化控制程序流程图

Fig. 3 Program flow chart of automation control

3.1 输出激光频率粗设定

通过 USB 数据连接线将波长计与计算机连接,并通过网线将输出激光器(SolsTis)与计算机连接,实现计算机、波长计与激光三者的通信与控制。根据光学频率合成器输出激光的目标频率 ν_i ,调整 SolsTiS 激光腔内的双折射滤光片(BRF)的角度,使钛宝石连续激光频率接近目标频率 ν_i ,如图 3 中的步骤 a。然后将波长计读出 SolsTiS 激光的频率与目标频率不断进行比较,依次调节 SolsTiS 激光腔内的双折射滤光片和薄标准具,使输出激光频率不断接近目标频率。当波长计显示的频率值与目标频率 ν_i 相差小于 300 MHz 时,计算机程序控制锁定 Etalon 长度。最后通过改变 SolsTiS 激光的参考腔上压电陶瓷的电压,调节参考腔的长度,使 SolsTiS 的频率锁定在波长计上(粗锁定),此时波长计读数与目标频率一致,如图 3 中的步骤 b。

3.2 光栅角度控制

在光学频率合成器中,为了减少人为调节,将入

射光方向和探测器的位置固定,此时入射光方向和一级衍射光之间存在固定夹角 θ 。在改变目标输出光频时,为了保证 SolsTiS 激光入射到光栅后,其一级衍射光都能准确入射到探测器上,需要通过转动光栅来调节激光入射角度。

已知光栅常数为 $a(a=8.3\times 10^{-7}\text{ m})$,激光入射角为 θ_i ,一级衍射角为 θ_m ,入射光与一级衍射光的夹角为 $\theta=\theta_m-\theta_i$ 。根据光栅方程

$$a(\sin \theta_i + \sin \theta_m) = \lambda, \quad (10)$$

得到入射角 θ_i 随激光波长 λ 的变化关系为

$$\theta_i = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2a \cos \frac{\theta}{2}} - \frac{\theta}{2}\right). \quad (11)$$

为了在改变 SolsTiS 输出激光频率时保证光栅转动角度的准确性,在控制光栅转动角度时要确认: 1)激光正入射时转动平台的位置,通过计算机控制转动平台的角度,当入射光与光栅零级衍射光完全重合时,设置 $\theta_i=0$ 。2)夹角 θ 的值由入射光方向、光栅和探测器的位置决定。为了能准确地测量 θ 的值,将探测器 PD₂的信号接到频谱仪上,并控制 SolsTiS 激光输出某一波长的激光,通过扫描转动平台的转动角度,监测频谱仪上拍频信号信噪比变化。当拍频信号的信噪比最大时,记下入射角 θ_i 及 SolsTiS 激光输出的波长值 λ ,代入(11)式,得到 θ 的值。通过多次改变 SolsTiS 激光输出的波长值 λ ,重复上述步骤后,对测得的 θ 角求平均值,即可获得准确的 θ 值。本文中, θ 为 8.19° 。在测得 θ 值后,可根据设定的目标波长 $\lambda_t=c/\nu_t$,代入(11)式,计算得到 θ_i ,并通过转动平台将光栅的角度设为计算值,如图3所示。

3.3 输出激光频率精细设定

当光梳频率锁定在参考激光上后, $\nu_{\text{ref}}、f_{\text{bl}}、f_r$ 和 f_0 都是确定值,那么参考激光与光梳的拍频有4种可能的情况:

$$f_{\text{bl}} = |N_1 f_r \pm f_0 \pm \nu_{\text{ref}}|. \quad (12)$$

因此,根据参考激光的频率 ν_{ref} (由波长计预先测得,测量精度为60 MHz)及计数器测得的 $f_{\text{bl}}、f_r$ 和 f_0 的值,可计算出4个 N_1 的值,分别对应(12)式中不同的正负号。取 N_1 最接近整数的组合,即为正确的 N_1 值及正确光梳表达式,如 $f_N = N f_r - f_0$,该组合由光梳表达式中 f_0 前面的正负号确定。

将输出激光的目标频率代入光梳表达式, $\nu_t = N'_2 f_r - f_0$,得到 N'_2 的值。 N'_2 不是整数,对其取次接近的整数后,记为 N_2 ,它是与输出激光目标频率

ν_t 次相邻的光梳梳齿序数。选择与 ν_t 次相邻的光梳梳齿而不是最相邻的梳齿的原因是: ν_t 与次相邻的光梳梳齿的拍频信号的频率 f_{b2} 在 $f_r/2$ 到 f_r 之间,即400~800 MHz,此时探测器的干扰信号少,容易取出 f_{b2} 信号。通过判断 N'_2 大于或者小于 N_2 ,来判断目标激光频率 ν_t 大于还是小于该梳齿 ν_{N_2} ,即目标频率与次相邻的光梳梳齿拍频信号的理论计算值 $(\nu_t - \nu_{N_2})_c$ 是正数还是负数。同时,还可以计算得到目标频率 ν_t 与相邻梳齿的拍频 $f_{\text{b2-c}}$:

$$f_{\text{b2-c}} = |N_2 - N'_2| \times f_r. \quad (13)$$

细微调节输出激光参考腔的腔长,使输出激光频率减小,根据计数器向计算机传输 f_{b2} 的测量值 $f_{\text{b2-m}}$ 。若 $f_{\text{b2-m}}$ 随输出激光频率减小,则表明输出激光 ν_{out} 与左梳齿拍频,即目标频率与次相邻的光梳梳齿拍频信号的实际测量值 $(\nu_{\text{out}} - \nu_{N_2})_m$ 为正号;反之,则是与右边梳齿拍频, $(\nu_{\text{out}} - \nu_{N_2})_m$ 为负号。通过判断 $(\nu_{\text{out}} - \nu_{N_2})_m$ 的正负号是否与计算的 $(\nu_t - \nu_{N_2})_c$ 的正负号相同且 $f_{\text{b2-m}}$ 是否等于计算值 $f_{\text{b2-c}}$,从而决定是否还需要继续微调输出激光参考腔的腔长,如图3中的判断语句。

3.4 信号处理

为了使图1(b)中各个环节的其他干扰信号最小,需要使用窄带射频滤波器将其他频率的干扰噪声滤除。实验中窄带滤波器采用机械可调滤波器,带宽约为中心频率的5%。但是当光学频率合成器的设定输出激光频率改变时,都需重新调整滤波器的滤波范围,这为实现光学频率合成器自动化带来了巨大的困难。

为解决这一问题,对图1(b)中的信号处理进行调整,如图4所示。参考激光与光梳拍频 f_{bl} 是固定值(314 MHz),将滤波后的 f_{bl} 与信号发生器 RF SYN₁混频到350 MHz后,送入窄带带通滤波器(BPF₂),因此 RF SYN₁的频率(f_{RF1})可以为664 MHz或36 MHz。通过选择上述两种 f_{RF1} 的值之一,可使方程不受 f_0 正负号的影响,都能通过与 f_0 混频后消除 f_0 的频率噪声。消除 f_0 后, f'_{bl} 的频率范围为200~250 MHz。

考虑到光学频率合成器的输出激光频率的可调谐特性,选择400~800 MHz带通滤波器(BPF₄),将 f_{b2} 滤出。同样为了使不同的光梳方程中 f_0 前面的正负号不影响消除 f_0 的功能,将 f_{b2} 与一射频信号(f_{RF2})混频到1 GHz。经窄带滤波器 BPF₅(1 GHz)后,与 f_0 混频,消除 f_0 的频率噪声,得到 f'_{b2} 的频率范围为850~900 MHz。

如果设 DDS₁ 的分频数 $K_1 = 4$, 则低通滤波器 LPF₁ 后的频率为 50.0~62.5 MHz。由于参考激光波长为 1064 nm, 光学频率合成器输出范围为 700~990 nm。为了满足 $N_1/K_1 = N_2/K_2$, 推断 K_2 的设置范围为 4.3~6.1。因此, f'_{b2} 的频率范围为 215~381 MHz, 带通滤波器 BPF₇ 的带宽为 200~400 MHz, 信号源 RF SYN₃ 的信号频率范围为 469~685 MHz。

设置上述滤波器和射频信号源的频率, 能使 ν_t 和光梳方程表达式不同时, 也能在不调节滤波器的情况下, 获得输出激光频率控制的误差信号。

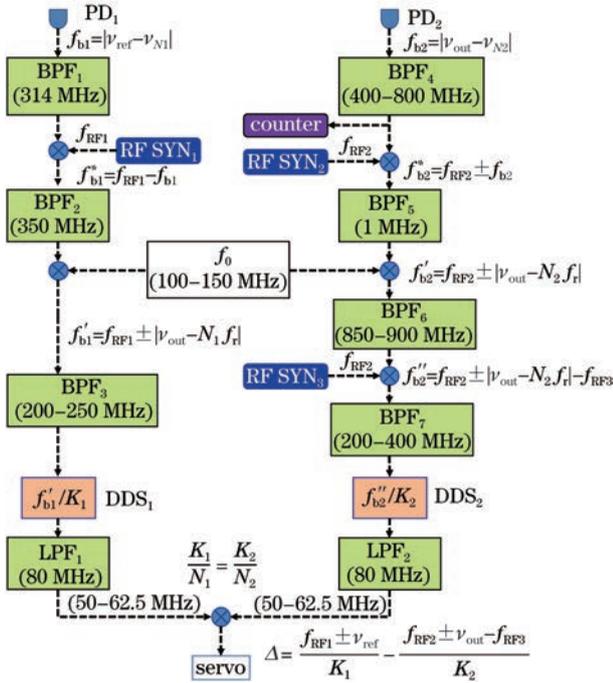


图 4 输出激光频率控制信号处理框图

Fig. 4 Processing block diagram for control signal for output laser frequency

3.5 光学频率合成器自动控制

在上述各部分实现自动化的基础上, 用计算机程序编制一个光学频率合成器输出频率精确控制的程序。同时, 为了测量自动化光学频率合成器的输出性能, 通过该程序将光学频率合成器的输出频率从 923 nm 处精确调节至目标频率 778.6 nm 波长附近, 并与一台独立的 1557 nm 参考腔稳频的激光器的倍频光进行拍频比对。如图 3 所示, 在计算机程序中设置光学频率合成器的频率的过程中, 记录输出激光的波长和输出激光与光梳的拍频信号 f_{b2} 的变化过程。

如图 5(a) 所示, 区域(I)表示计算机将输出激光的频率粗调节到 ν_t , 如图 3 中的步骤 a, 该步骤共

需 8 s; 与此步骤同时进行的是转动光栅所在的转台, 当输出激光波长从 923 nm 处调节至 778.6 nm 处, 输入角 θ_i 从 29.506° 变成 23.832°, 所用时间约为 2 s; 图 5(a) 中的区域(II)表示控制输出激光的频率等于波长计上的读数, 即图 3 中的步骤 b。在 8~11 s 内, 计算机根据波长计的读数改变 SolsTiS 激光腔内的双折射滤光片; 在 12~26 s 内使用 SolsTiS 激光腔内的薄标准具对激光频率进行较为精细的调节; 从 27 s 开始, 由于波长计显示的频率值与目标频率 ν_t 相差小于 300 MHz, 此时计算机开始控制 SolsTiS 激光的参考腔腔长, 使波长计读数与目标频率一致。在区域(III)中, 通过细微调节输出激光的参考腔的腔长, 先判别参与拍频获得 f_{b2-m} 信号的梳齿是否与计算的梳齿位置相同, 即图 3 中的判断语句。图 5(a) 中, 在 37~40 s 内, 程序判断出 $(\nu_{out} - \nu_{N2})_m$ 与 $(\nu_t - \nu_{N2})_c$ 是同号, 因此 40 s 后计算机开始精细调节输出激光参考腔的腔长, 直至 f_{b2-m} 等于计算值 f_{b2-c} , 此时输出激光的频率被精细设定到目标频率处。上述将输出激光波长从 923 nm 调节至目标波长并获得输出激光频率控制误差信号的过程共需 58 s。利用输出激光频率控制误差信号, 手动调节伺服反馈控制系统的增益(约 10 s), 可将输出激光的频率精确地设定在目标频率上, 即 $\nu_{out} = \nu_t = \nu_{ref}/R$ 。

由于输出激光器在 700~1000 nm 调谐范围内的输出功率有起伏, 在上述波长调节范围的边缘, 激光输出功率较中心波长处偏小。因此, 当光学频率合成器输出波长在边缘时, 还需要手动调节入射到 PD₂ 探测器, 通过具有足够高信噪比的 f_{b2} 来控制输出激光的频率。目前, 实验中不需要调节功率的波长范围为 770~870 nm, 在该段范围内 f_{b2} 的信噪比可以保持在 30 dB 以上(300 kHz 带宽下)。另外, 当输出光与光梳拍频 f_{b2} 正好在 $[f_r/2, f_r/2 + 10]$ 和 $[f_r - 20, f_r]$ 范围内时, 受滤波器带宽的限制, 无法将 $f_r - f_{b2}$ 或 f_r 从 f_{b2} 中完全滤除, 此时需要手动调节飞秒锁模脉冲激光腔内其中一个腔镜的位置(压电陶瓷上的电压), 改变重复频率, 如将光梳重复频率改变 100 Hz 左右, 可使 f_{b2} 改变量达到 40 MHz, 从而避开上述频率范围。如果探测器的探测带宽允许, 也可以通过改变锁定光梳用的 f_{b1} 值, 从而实现对重复频率的改变, 使 f_{b2} 避开上述频率范围。

图 5(b) 为光学频率合成器输出激光的频率, 与激光频率被精确控制在目标频率处后 1557 nm 参

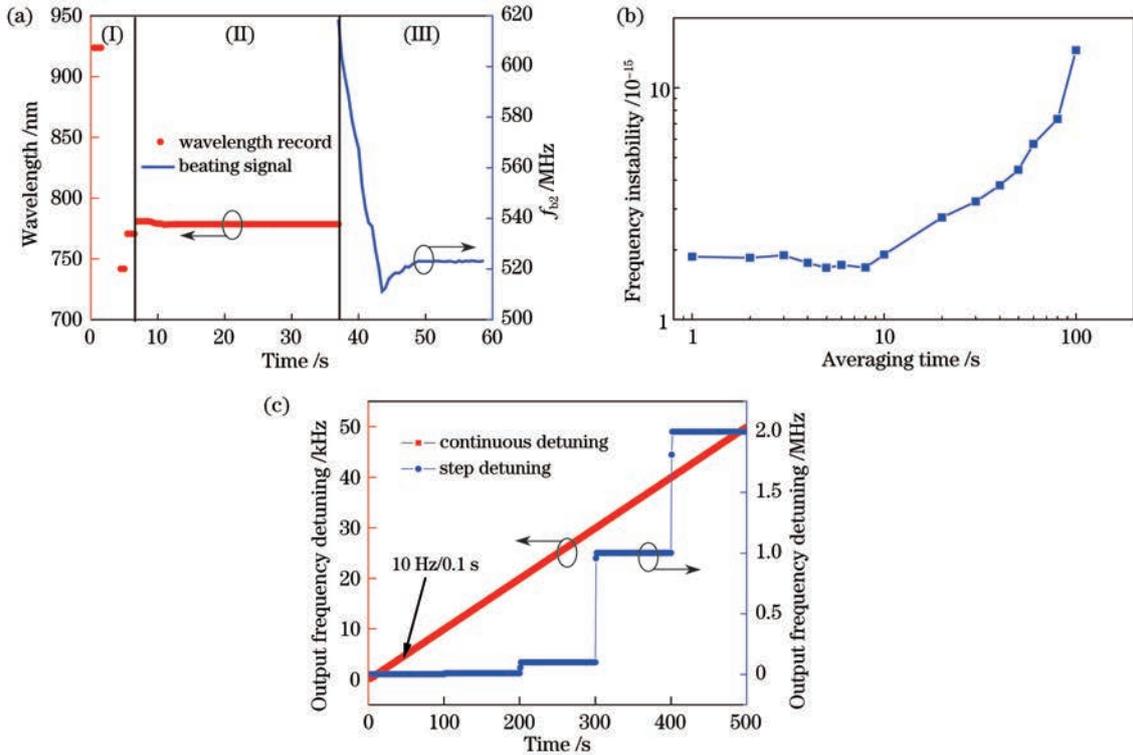


图5 光学频率合成器性能测试。(a)频率设定过程中输出激光波长与拍频信号 f_{b2-m} 的变化情况[(I)代表激光粗调,(II)代表根据波长计读数反复调节激光频率至 ν_i , (III)代表根据 f_{b2} 计算值调节];(b)光学频率合成器输出信号与 1557 nm 稳频激光的倍频光拍频信号的频率不稳定性测量;(c)光学频率合成器输出频率扫描测试

Fig. 5 Performance evaluation of optical frequency synthesizer. (a) Variations of wavelength of output laser and f_{b2-m} during frequency setting process [(I) represents laser frequency coarse tuning, (II) represents laser frequency tuning according to wavemeter, and III represents fine according to f_{b2}]; (b) frequency instability of beating signal between optical frequency synthesizer and the second harmonic of cavity-stabilized 1557 nm laser; (c) scanning test of output frequency of optical frequency synthesizer

考腔稳频激光器的倍频激光频率的比对图。这台独立的 1557 nm 稳频激光器的频率不稳定性在 8×10^{-16} (平均时间为 1 s), 线宽为 0.26 Hz^[28]。因此从两者的拍频数据中可以得出, 光学频率合成器输出激光的频率不稳定性为 1.6×10^{-15} (平均时间为 1 s), 接近光学频率合成器的参考激光的性能。

与射频频率合成器类似, 光学频率合成器的输出激光频率也能被扫描和调节。在精密控制光学频率合成器输出激光的频率后, 通过改变图 4 中的信号源 RF SYN₃ 的输出频率可调节光学频率合成器的输出激光频率。对信号源 RF SYN₃ 的输出信号进行 10 Hz/0.1 s 的频率扫描, 测得光学频率合成器输出光频率的变化率也为 10 Hz/0.1 s, 如图 5(c) 中的直线。由于受伺服反馈控制系统响应速度的影响, 当信号源 RF SYN₃ 的扫描速度大于 10 Hz/0.1 s 时, 光学频率合成器输出激光的频率不稳定性会大于 1.6×10^{-15} (平均时间为 1 s)。同时, 该光学频率合成器也能实现阶跃式频率调

节。图 5(c) 分段直线表示当信号源 RF SYN₃ 进行不同步进的阶跃式改变时, 光学频率合成器输出激光的频率也会发生相应变化。实验测得, 在光学频率合成器不失锁的情况下, 最大的阶跃步进为 2 MHz。受滤波器带宽限制, 上述光学频率合成器工作模式下的最大调节范围不超过 400 MHz。另外, 在激光频率进行扫描时, 如果输出光与光梳拍频 f_{b2} 在 $[f_r/2, f_r/2 + 10]$ 和 $[f_r - 20, f_r]$ 范围时, 则需要对光梳重复频率进行调整, 再对光梳和光学频率合成器进行锁定。如果需要实现更大的阶跃式频率调节或者更快速频率扫描, 也可在图 2 的 ν_{out} 后端加入一个声光调制器(AOM), 通过控制该 AOM 的驱动信号频率来实现输出激光频率大范围及快速扫描。

4 结 论

通过计算机控制实现对光学频率合成器输出光频的精确设定, 大大简化了光学频率合成器波长调

节过程中的人为光路调整、计算与仪器设置等步骤。只需在程序中输入指定的目标激光频率值,便可快速获得输出激光频率锁定的误差信号,再通过人为调节伺服反馈控制系统可在目标频率处获得高精度地激光输出,输出激光的频率不稳定性达 1.6×10^{-15} (平均时间为 1 s)。后续研究将结合数字光频精密控制锁定系统,有望实现光学频率合成器的全自动化控制,为其向实用化发展迈出重要一步。

参 考 文 献

- [1] Bloom B J, Nicholson T L, Williams J R, *et al.* An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level[J]. *Nature*, 2014, 506(7486): 71-75.
- [2] McGrew W F, Zhang X, Fasano R J, *et al.* Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level[J]. *Nature*, 2018, 564(7734): 87-90.
- [3] Huntemann N, Sanner C, Lipphardt B, *et al.* Single-ion atomic clock with 3×10^{-18} systematic uncertainty[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(6): 063001.
- [4] Takano T, Takamoto M, Ushijima I, *et al.* Geopotential measurements with synchronously linked optical lattice clocks[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(10): 662-666.
- [5] Tian X, Xu Q F, Yin M J, *et al.* Experiment study on optical lattice clock of strontium at NTSC[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s1): s102001.
田晓, 徐琴芳, 尹默娟, 等. 国家授时中心锶原子光钟的实验研制进展[J]. *光学学报*, 2015, 35(s1): s102001.
- [6] Abgrall M, Chupin B, de Sarlo L, *et al.* Atomic fountains and optical clocks at SYRTE: status and perspectives[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2015, 16(5): 461-470.
- [7] Ludlow A D, Boyd M M, Ye J, *et al.* Optical atomic clocks[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87(2): 637-701.
- [8] Bondarescu R, Schäfer A, Lundgren A, *et al.* Ground-based optical atomic clocks as a tool to monitor vertical surface motion[J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 202(3): 1770-1774.
- [9] Chou C W, Hume D B, Rosenband T, *et al.* Optical clocks and relativity[J]. *Science*, 2010, 329(5999): 1630-1633.
- [10] Kolkowitz S, Pikovski I, Langellier N, *et al.* Gravitational wave detection with optical lattice atomic clocks[J]. *Physical Review D*, 2016, 94(12): 124043.
- [11] Delva P, Lodewyck J, Bilicki S, *et al.* Test of special relativity using a fiber network of optical clocks[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(22): 221102.
- [12] Weislo P, Morzyński P, Bober M, *et al.* Experimental constraint on dark matter detection with optical atomic clocks[J]. *Nature Astronomy*, 2016, 1(1): 0009.
- [13] Riehle F, Gill P, Arias F, *et al.* The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures[J]. *Metrologia*, 2018, 55(2): 188-200.
- [14] Hall J L. Nobel lecture: defining and measuring optical frequencies[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1279-1295.
- [15] Hänsch T W. Nobel lecture: passion for precision[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1297-1309.
- [16] Ma L S. Optical frequency synthesis and comparison with uncertainty at the 10^{-19} level[J]. *Science*, 2004, 303(5665): 1843-1845.
- [17] Fortier T M, Kirchner M S, Quinlan F, *et al.* Generation of ultrastable microwaves via optical frequency division[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(7): 425-429.
- [18] Jost J D, Hall J L, Ye J. Continuously tunable, precise, single frequency optical signal generator[J]. *Optics Express*, 2002, 10(12): 515-520.
- [19] Yao Y, Jiang Y Y, Wu L F, *et al.* A low noise optical frequency synthesizer at 700-990 nm[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(13): 131102.
- [20] Spencer D T, Drake T, Briles T C, *et al.* An optical-frequency synthesizer using integrated photonics[J]. *Nature*, 2018, 557(7703): 81-85.
- [21] Fang S, Chen H Q, Wang T Y, *et al.* Optical frequency comb with an absolute linewidth of 0.6 Hz-1.2 Hz over an octave spectrum[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(23): 231118.
- [22] Telle H R, Lipphardt B, Stenger J. Kerr-lens, mode-locked lasers as transfer oscillators for optical frequency measurements[J]. *Applied Physics B*, 2002, 74(1): 1-6.
- [23] Stenger J, Schnatz H, Tamm C, *et al.* Ultraprecise measurement of optical frequency ratios[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(7): 073601.
- [24] Yao Y, Jiang Y Y, Yu H F, *et al.* Optical frequency divider with division uncertainty at the 10^{-21} level[J]. *National Science Review*, 2016, 3(4): 463-469.
- [25] Li X Y, Jiang Y Y, Yao Y, *et al.* Design of thermal shield of optical cavities for low sensitivity to environmental temperature fluctuations[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0714002.
李雪艳, 蒋燕义, 姚远, 等. 环境温度变化不敏感的光学腔热屏蔽层设计[J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0714002.

- [26] Chen H Q, Jiang Y Y, Fang S, *et al.* Frequency stabilization of Nd:YAG lasers with a most probable linewidth of 0.6 Hz[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2013, 30(6): 1546-1550.
- [27] Jiang Y Y, Bi Z Y, Robertsson L, *et al.* A collinear self-referencing set-up for control of the carrier-envelope offset frequency in Ti: sapphire femtosecond laser frequency combs[J]. Metrologia, 2005, 42(4): 304-307.
- [28] Wu L F, Jiang Y Y, Ma C Q, *et al.* 0.26-Hz-linewidth ultrastable lasers at 1557 nm[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 24969.