

引用格式: LI Yi-dan, CAO Yuan, WANG Xu-dong, *et al.* Doppler Frequency Shift Measuring Method Based on Dispersion-tuned Actively Mode-locking Technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(11):1149015

李依丹,曹元,王旭东,等. 基于色散调谐主动锁模技术的频率偏移测量方法[J]. 光子学报, 2020, 49(11):1149015

# 基于色散调谐主动锁模技术的频率偏移测量方法

李依丹, 曹元, 王旭东, 张杰君, 冯新焕, 关柏鸥

(暨南大学 光子技术研究院, 广州 511486)

**摘 要:**提出并实现了一种基于色散调谐主动锁模光纤激光器技术的多普勒频移测量方法,该方法利用大色散谐振腔主动锁模激光器的输出波长与调制频率呈线性这一特性,通过测量锁模激光器输出波长来标定输入系统的微波频率,进而获得多普勒频移.通过模拟仿真,分析了激光器腔长、色散量以及锁模阶数等参量对系统频率测量特性的影响,在理论指导下,针对不同应用场景设计了分别基于长光纤及线性啁啾布拉格光纤光栅的大色散谐振腔结构,实现了载波中心频率分别为 12.2 MHz、265 MHz、682 MHz 和 1.118 7 GHz 情况下的频率偏移测量.所提出的测量方法具有结构简单、设计灵活的优点,在多普勒频移测量方面具有应用价值.

**关键词:**色散调谐;锁模光纤激光器;微波光子;多普勒频移;频率测量

中图分类号:TN248

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204911.1149015

## Doppler Frequency Shift Measuring Method Based on Dispersion-tuned Actively Mode-locking Technique

LI Yi-dan, CAO Yuan, WANG Xu-dong, ZHANG Jie-jun, FENG Xin-huan, GUAN Bai-ou  
(*Institute of Photonic Technology, Jinan University, Guangzhou 511486, China*)

**Abstract:** A novel method for measuring Doppler Frequency Shift (DFS) based on dispersion-tuned Actively Mode-Locked Fiber Laser (AMLFL) technique is proposed and successfully demonstrated. The measurement principle is based on the fact that the output wavelength of the actively mode-locked fiber laser is linearly related to the Radio Frequency (RF) applied to the modulator in the laser cavity with large dispersion, so that the input frequency and further the DFS can be obtained by measuring the output wavelength of the AMLFL. Influences of system parameters such as the laser cavity length, dispersion, and mode-locked orders on the system performance are theoretically analyzed. Under the guidance of the simulation and for different application condition, two experiments are designed respectively based on long Dispersion-compensated Fiber (DCF) and Linearly Chirped Fiber Bragg Grating (LC-FBG) to provide large dispersion, and DFS measurements are conducted when the carrier frequencies are respectively 12.2 MHz, 265 MHz, 682 MHz and 1.118 7 GHz. The technique has advantages of simple configuration and flexible design, and may have potential application in measurement of Doppler frequency shift.

**Key words:** Dispersion-tuned; Actively mode-locked fiber laser; Microwave photonics; Doppler frequency shift; Frequency measurement

**OCIS Codes:** 140.3510; 140.4050; 060.5625; 060.2320

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61771221, 61860206002, 61701193)

第一作者:李依丹(1994—),女,硕士研究生,主要研究方向为基于光纤激光器的微波光子信号处理技术.Email: 1817601494@qq.com

导师(通讯作者):冯新焕(1974—),女,教授,博士,主要研究方向为光纤激光及微波光子信号处理技术.Email: tfengxh@jnu.edu.cn

收稿日期:2020-09-14;录用日期:2020-10-14

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

多普勒频率偏移(Doppler Frequency Shift, DFS)是指由于波(包括声波、光波和无线电波等)的发生源与接受设备之间存在相对运动,接收设备收到的波的频率与发生源所发出的频率不同的现象,这种频率间的差值被称为多普勒频移.多普勒频移广泛存在于移动通信、卫星通信和导航制导等系统中,给信号的检测和分析带来困难,并影响到通信质量,因此,对其进行准确测量并补偿就显得非常必要<sup>[1-3]</sup>.

目前,多普勒频移检测方法主要包括传统微波学和微波光子学测量方法两大类.其中传统微波学测量方法基于全电子器件和设备,具有精度高和稳定性好等优点,然而,该类方法的抗干扰能力差、系统复杂、成本高,尤其受电子速率瓶颈限制,很难满足高速率、大容量通信系统的需求<sup>[4]</sup>.近年来,出现的基于微波光子学的多普勒频移测量方法,以各类调制器为基础,结合其他器件和技术实现多普勒频移的测量,可以覆盖更宽的频段且有着更大的频率调谐范围<sup>[5-11]</sup>.其中基于光混频和光学矢量混频的多普勒频移测量方法使用最为广泛<sup>[8-11]</sup>.光混频法主要通过两个电光调制器(Electro-optic Modulator, EOM)使传输信号与回波信号产生频率差,通过光电探测器(Photo Detector, PD)拍频得到多普勒频移的大小<sup>[9]</sup>,但是在某些场合不仅需要测量多普勒频移的大小还需要测量方向,因此将传统光混频方法与光学移频方法相结合得到光学矢量混频法<sup>[8]</sup>.基于微波光子的多普勒频移测量方法具有抗电磁干扰,可测量频带覆盖宽,插入损耗低等优点,然而,其仍存在缺点,比如需要激光作为光源,还需要信号发生器产生微波信号作为传输信号加载到调制器上,传输信号与运动目标产生多普勒频移后作为回波信号加载于另一调制器上,再对两信号进行处理,最终得到多普勒频移的大小和方向,其中至少使用两个调制器(Modulator)级联,且多为双驱动偏振复用马赫曾德尔调制器(Polarization Division Multiplexing Mach-Zehnder Modulator, PDM-MZM)或双平行马赫-曾德尔调制器(Dual Parallel Mach-Zehnder Modulator, DP-MZM)等较为复杂的调制器类型,结构相对复杂<sup>[8-11]</sup>.

本文提出了一种基于色散调谐主动锁模光纤激光器技术的频率及频偏测量方法,该方法基于色散调谐主动锁模激光器的输出波长与输入调制频率呈线性关系的特性,通过测量锁模激光器输出波长来确定输入系统的微波频率,进而获得多普勒频移.此项技术一般应用于高速扫频激光器中,本文将其应用于多普勒频移测量.通过模拟仿真,分析了系统关键参量对频率测量特性的影响,并在理论指导下,针对不同应用场景分别设计了多普勒频移测量实验.试验中基于长光纤及线性啁啾布拉格光纤光栅的大色散谐振腔结构,实现了载波中心频率分别为12.2 MHz、265 MHz、682 MHz和1.118 7 GHz情况下的频率偏移.测量方法仅利用一个强度调制器,具有原理简单、设计灵活的优点.

## 1 测量原理及仿真分析

测量方法基于色散调谐主动锁模激光器,激光器结构如图1所示,不同于常规主动锁模光纤激光器结构,该激光器腔内引入了大色散器件,使得不同的波长的腔基频有很大区别,因此,对于特定的输入的调制频率,会有特定波长满足锁模条件而形成脉冲输出,其它波长无法形成稳定锁模输出,而且输出波长与调制

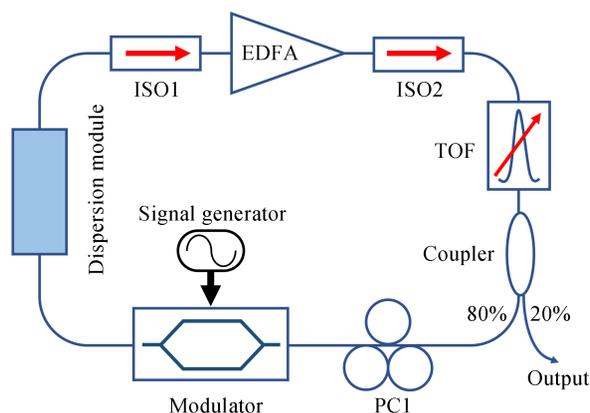


图1 色散调谐主动锁模光纤激光器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of dispersion-tuned actively mode-locked fiber laser

频率之间存在着线性关系<sup>[12-14]</sup>.在图1中,掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)提供光增益,隔离器(Isolator, ISO)确保激光腔内光单向运转,可调谐光滤波器(Tunable Optical Filter, TOF)起到调节激光中心波长的作用,通过耦合器使80%的光在腔内振荡,20%作为输出以观测其光谱,马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)受到微波信号发射器(Signal Generator, SG)产生的待测射频信号的驱动实现主动锁模状态,因为调制器为偏振相关器件,所以使用偏振控制器(Polarization Controller, PC)调节入射进调制器的光的偏振态,色散模块(Dispersion Module, DM)起到提供大色散的作用.

激光器谐振腔的腔基频 $F$ 为

$$F = c/nL \quad (1)$$

式中, $n$ 为腔内平均折射率, $L$ 为激光器腔长, $c$ 为真空中光速.根据锁模理论,当输入调制器的微波频率为激光谐振腔基频的整数倍,可以实现稳定的锁模脉冲输出.

在存在色散的谐振腔内,式(1)中折射率与波长 $\lambda$ 相关,因此不同波长 $\lambda$ 所对应的腔基频 $F$ 不再相同,它们之间存在如下关系<sup>[13]</sup>

$$\lambda = -\frac{n_0^2}{cDF_0}(F - F_0) + \lambda_0 = -\frac{n_0^2 L}{c^2 D}(F - F_0) + \lambda_0 \quad (2)$$

式中, $F_0$ 为波长为 $\lambda_0$ 时的腔基频, $n_0$ 为波长为 $\lambda_0$ 时的腔内折射率, $D$ 为色散参量(ps/nm·km).在锁模激光器中,因为输入微波频率 $f_m = N \cdot F$ (其中正整数 $N$ 为谐波锁模阶数),得<sup>[13]</sup>

$$\lambda_m = -\frac{n_0^2 L}{c^2 ND}(f_m - f_{m0}) + \lambda_0 = -\frac{n_0}{cDf_{m0}}(f_m - f_{m0}) + \lambda_0 \quad (3)$$

式中, $f_m$ 为调制频率, $\lambda_m$ 为调制频率为 $f_m$ 时对应的锁模波长, $\lambda_0$ 为调制频率为 $f_{m0}$ 时对应的锁模波长.

由式(3)可以看出,由于激光谐振腔内的色散存在,对应输入的不同调制频率,可以实现不同波长的激光锁模输出,并且输出波长随输入调制频率呈线性变化关系,这也是色散调谐主动锁模技术的核心<sup>[12-15]</sup>.

图2给出了激光谐振腔长 $L=300$  m,腔基频 $F=0.68$  MHz,中心调制频率 $f_m=250$  MHz, $n_0=1.46$ ,谐波锁模阶数 $N=368$ 时锁模激光输出的波长与输入待测调制频率的关系,可看出两者存在线性关系,通过对输出波长的采集和分析可以实现输入微波频率的测量.该方法可用于测量多普勒频移后的微波频率,与已知特定频率相比即可获得多普勒频移.此即为本文所提出的微波频率及多普勒频偏测量的技术核心.

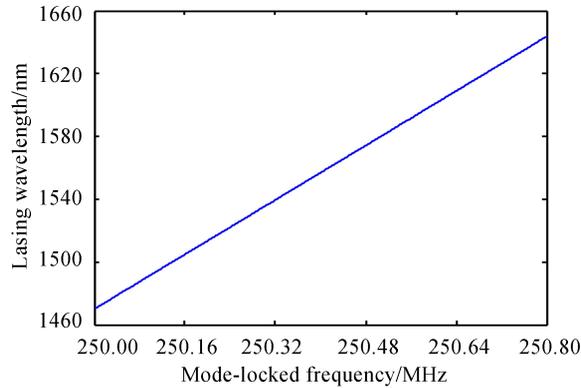


图2 输出波长与输入调制频率的关系

Fig.2 Relation between lasing wavelength and measurement frequency

通过对式(3)两边求微分可得到波长随频率变化的测量灵敏度<sup>[14-15]</sup>

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta f} = -\frac{n_0^2 L^2}{c^2 ND_{\text{total}}} \quad (4)$$

式中, $D_{\text{total}}$ 为腔内总色散量(ps/nm).对于一个频率测量系统来说,重要的两个性能参数是测量范围和灵敏度.从式(3)和(4)可以发现,影响测量范围和灵敏度的激光器参数主要是腔长 $L$ 、谐波锁模阶数 $N$ 以及总色散量 $D_{\text{total}}$ .为了深入研究所提出的频率测量方法的测量特性,将分别针对激光器腔长 $L$ 、谐波锁模阶数 $N$ 以及总色散量 $D_{\text{total}}$ 三个参数对系统的性能的影响进行模拟仿真,以优化这些物理参量,使测量性能最佳,为测

量方案的设计及实现提供理论指导.

### 1.1 激光器腔长 $L$ 对系统性能的影响

根据锁模激光器的工作原理可知,为了测量更高频率,激光器应工作在谐波锁模状态,为保证输出波长与待测频率的唯一对应关系,应将频率测量范围限制在  $NF$  与  $(N+1)F$  之间<sup>[14]</sup>,即测量范围应小于等于一个腔基频.根据式(1)与(4),可以得到测量频率范围以及测量灵敏度随激光腔长的变化关系,图3为  $N=380, D_{\text{total}}=-995.6 \text{ ps/nm}$  时两者的变化关系图.

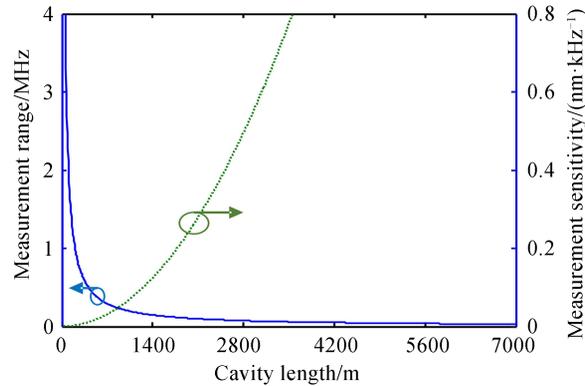


图3 测量频率范围以及测量灵敏度随激光腔长的变化关系,  $N=380, D_{\text{total}}=-995.6 \text{ ps/nm}$

Fig.3 Measurement range and measurement sensitivity at different cavity length,  $N=380, D_{\text{total}}=-995.6 \text{ ps/nm}$

从图3可知,测量频率范围随着腔长的增大而减小,且经过拐点后变化趋势逐渐变缓.测量灵敏度则随之而增大.因为腔长增大,则腔基频减小,所以测量范围随之减小.随着腔基频的减小,相同波长差对应的腔基频差值减小,因此测量灵敏度随之变大.由图中可以看出在腔长超过一定长度时,相对于测量范围,测量灵敏受腔长影响更明显,而在腔长较短时,测量范围受腔长的影响更大一些.因此,在实际应用中需要根据具体情况及需求进行设计,例如,对于测量频率范围较小且灵敏度需求高的情况,应采用长腔长结构,在测量频率范围大且灵敏度需求不高时,可采用短腔长结构.

### 1.2 灵敏度与谐波锁模阶数 $N$ 的关系

待测频率应在  $NF$  与  $(N+1)F$  所确定的频率范围中,腔基频一旦确定,谐波锁模阶数越大,对应的待测频率越高.另外,根据式(4),测量灵敏度与  $N$  为反比关系.图4给出了  $L=300 \text{ m}, D_{\text{total}}=-600 \text{ ps/nm}$  时频

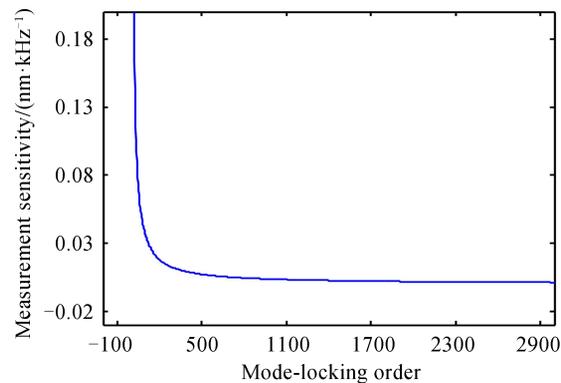


图4 测量灵敏度与谐波锁模阶数的关系,  $L=300 \text{ m}, D_{\text{total}}=-600 \text{ ps/nm}$

Fig.4 Measurement sensitivity at different mode-locked order,  $L=300 \text{ m}, D_{\text{total}}=-600 \text{ ps/nm}$

率测量灵敏度与谐波锁模阶数  $N$  的关系曲线,从图4可以看出,测量灵敏度随着谐波锁模阶数  $N$  的增大而减小,且当  $N$  增大到某个数值时,变化趋势明显由迅速减小变为缓慢减小.这是因为待测频率  $f_m$  是腔基频的  $N$  倍,当  $N$  增大时,引起同样的波长变化需要更大的频率变化,因此测量灵敏度随着谐波锁模阶数  $N$  的增大而减小,同样的结构在测量高频时的测量灵敏度会小于测量低频时的灵敏度.因此,测量高频时,为保证测量

灵敏度应该降低锁模阶数,即可使用短腔结构来增大腔基频,使相同的高频对应的锁模阶数比长腔结构更小,从而避免测量高频时导致测量灵敏度降低.

### 1.3 灵敏度与腔内色散总量 $D_{\text{total}}$ 的关系

根据式(4)可模拟不同腔长下测量灵敏度与锁模激光器腔内总色散的关系,如图5所示,分别模拟了腔长为10 m,50 m,500 m,1 500 m和3 000 m时测量灵敏度随色散总量的变化趋势.由图可知,随着腔内色散总量的增大,测量灵敏度明显下降.因为色散总量越大,不同波长在腔内的光程差越大,使各个腔基频之间的差值越大,因此待测频率需要有更大的变化使输出波长改变.由图5还可看出,随着色散总量的增加,测量灵敏度的变化趋势由迅速变化变为缓慢变化,测量灵敏度迅速变化与缓慢变化的转折点对应的色散量和腔长有关,即与腔基频大小有关.另外,由图5可知,色散总量较小时,相同色散总量下不同腔长的测量灵敏度差别较大,当色散总量较大时,不同腔长间的色散灵敏度的差别会逐渐减小.因此,在实际应用中,为获得较高频率测量灵敏度,需要选择小色散、大腔长的激光腔结构.

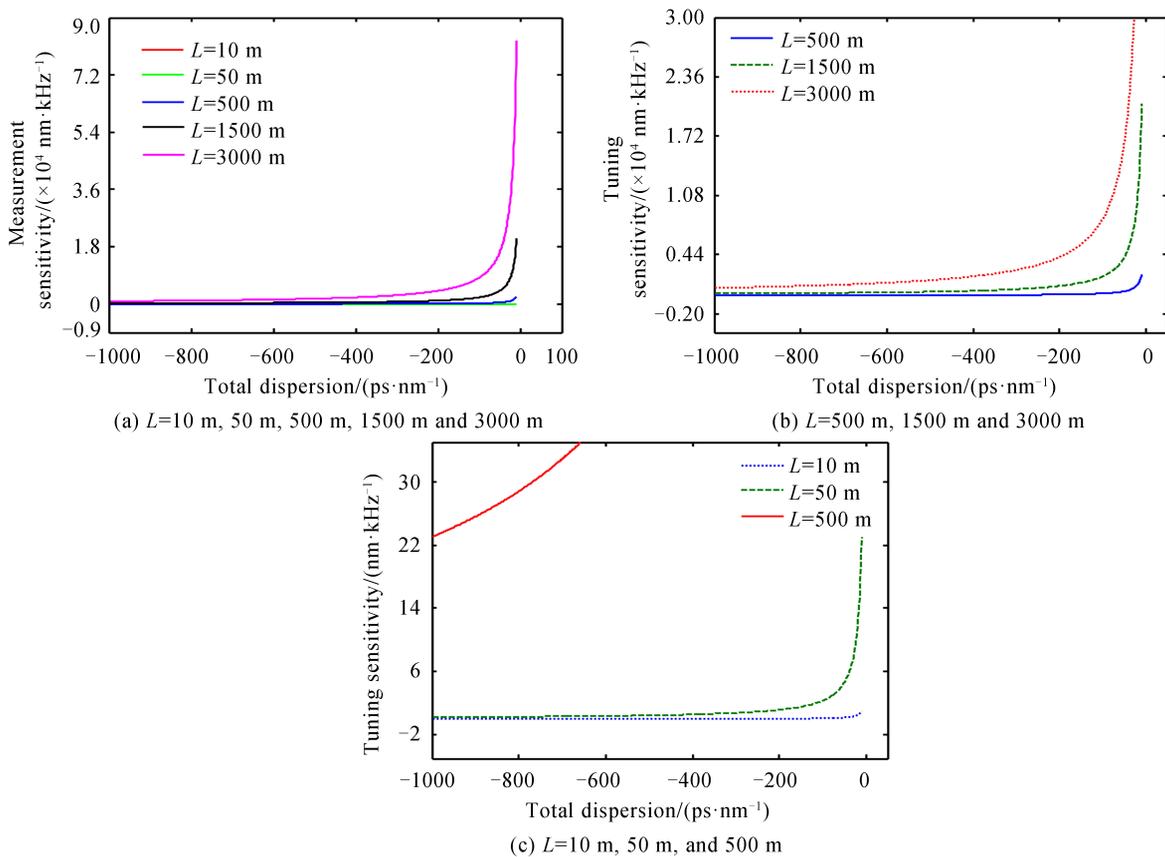


图5 腔长分别为10 m,50 m,500 m,1 500 m和3 000 m时测量灵敏度与色散总量的关系, $N=260$

Fig.5 Measurement sensitivity at different total dispersion with cavity length,  $L = 10 \text{ m}$ ,  $50 \text{ m}$ ,  $500 \text{ m}$ ,  $1 500 \text{ m}$  and  $3 000 \text{ m}$ ,  $N=260$

### 1.4 灵敏度与各参量理论模拟

根据理论模拟与分析可知系统的测量灵敏度和色散总量、腔长以及谐波锁模阶数有关,且这三项参数也存在互相影响关系,所以将三种参量与色散灵敏度综合分析进行仿真模拟,结果如图6所示,腔长对于测量灵敏度的影响相对平缓,谐波锁模阶数和色散总量存在某一拐点,拐点前后变化速度差别较大.因此,在对于系统的设计中,应当区分高频与低频的结构,根据实际的灵敏度需求进行设计.

## 2 实验与讨论

根据以上理论模拟与分析,频率测量范围和测量灵敏度受腔长、谐波锁模阶数和色散总量的综合影响,为了探究在实际应用中不同设计的可行性,使用了两种不同的色散介质进行实验,分别为长光纤结构的色

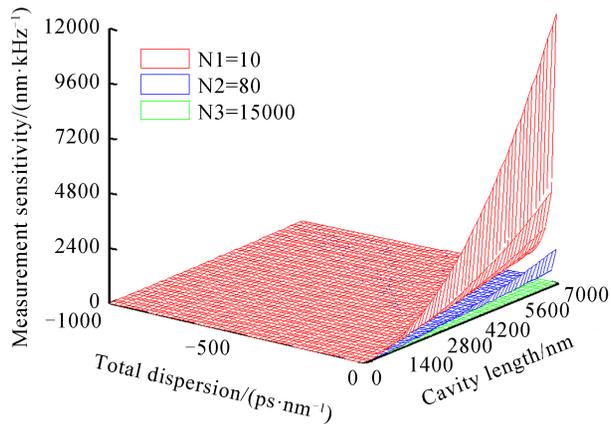


图6  $N_1=10, N_2=80, N_3=15\ 000$ 时,测量灵敏度与色散总量以及腔长的关系

Fig.6 Measurement sensitivity at different total dispersion and cavity length with different mode-locked order,  $N_1=10, N_2=80, N_3=15\ 000$

散模块和LC-FBG的色散模块,通过实验结果对比,分析不同结构分别适用多普勒频移测量应用场景.

### 2.1 基于长光纤结构的频率测量实验

根据图1的原理设计,在腔内加入长色散光纤进行实验,实验装置如图7.实验中利用EDFA(AEDFA-33-B-FA, Amonics)作为增益介质,使用色散总量为 $-995.6\text{ ps/nm}$ 色散补偿光纤(Dispersion Compensating Fiber, DCF)构成的色散模块(DCM-60-C, ofs)引入色散,通过TOF(BVF-300CL, Alnair Labs)进行波长范围限制,利用微波信号发生器(HMC-T2220, Hittite)调制MZM(SN-334971D, JDSU)实现谐波锁模.在实验中通过调节微波信号发生器输出频率模拟待测信号,用光谱仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA, AQ6370C, YOKOGAWA)对输出波长进行测量,从而得到待测信号频率及对某特定频率的偏移量.

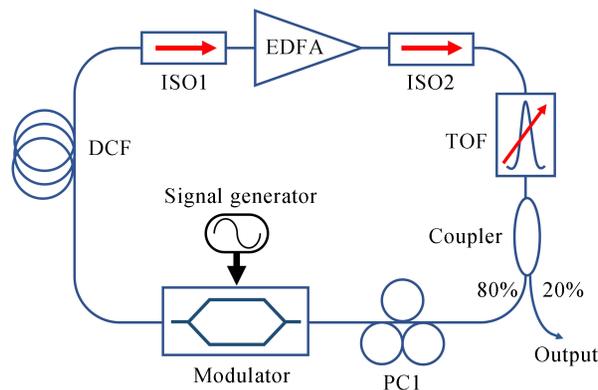


图7 基于长色散补偿光纤引入色散的频率测量结构示意图

Fig.7 Schematic diagram of frequency measurement setup based on DCF

图8为基于长光纤结构的频率测量实验的结果分析,色散总量 $D_{\text{total}}=-996.5\text{ ps/nm}$ ,取腔内折射率 $n=1.4682$ ,腔长 $L=5\ 668\text{ m}$ ,测得腔基频为 $36.05\text{ kHz}$ .图8(a)为中心频率 $12.2\text{ MHz}$ ,以 $220\text{ Hz}$ 为步长频率变化的激光器输出光谱图,图8(b)中红色星号为实验中测量得数据,蓝色实线为根据实验参数通过式(3)仿真得到的曲线,谐波锁模阶数 $N=338$ ,测量灵敏度 $S=0.002\ 27\text{ nm/Hz}$ .通过图8(a)可以看出在某一测量频率对应的波长处有明显的激光输出,随着频率的变化,某些波长处会出现一些边模,但是对结果的测量不产生影响.通过图8(b)可以看出,在一个腔基频范围内,输出波长与频率存在一一对应的线性关系,实验数据与理论模拟具有较好一致性.

图8(c)为中心频率为 $265\text{ MHz}$ ,频率步长随机变化的激光器输出图,图8(d)中红色星号为实验数据,蓝色实线为根据实验参数与式(3)仿真得到的曲线,谐波锁模阶数 $N=7\ 101$ ,测量灵敏度 $S=0.000\ 12\text{ nm/Hz}$ .通过图8(c)可以看出,光谱上有稳定的单波长输出,且随着频率的变化,输出波长变化.通过图8(d)中的图

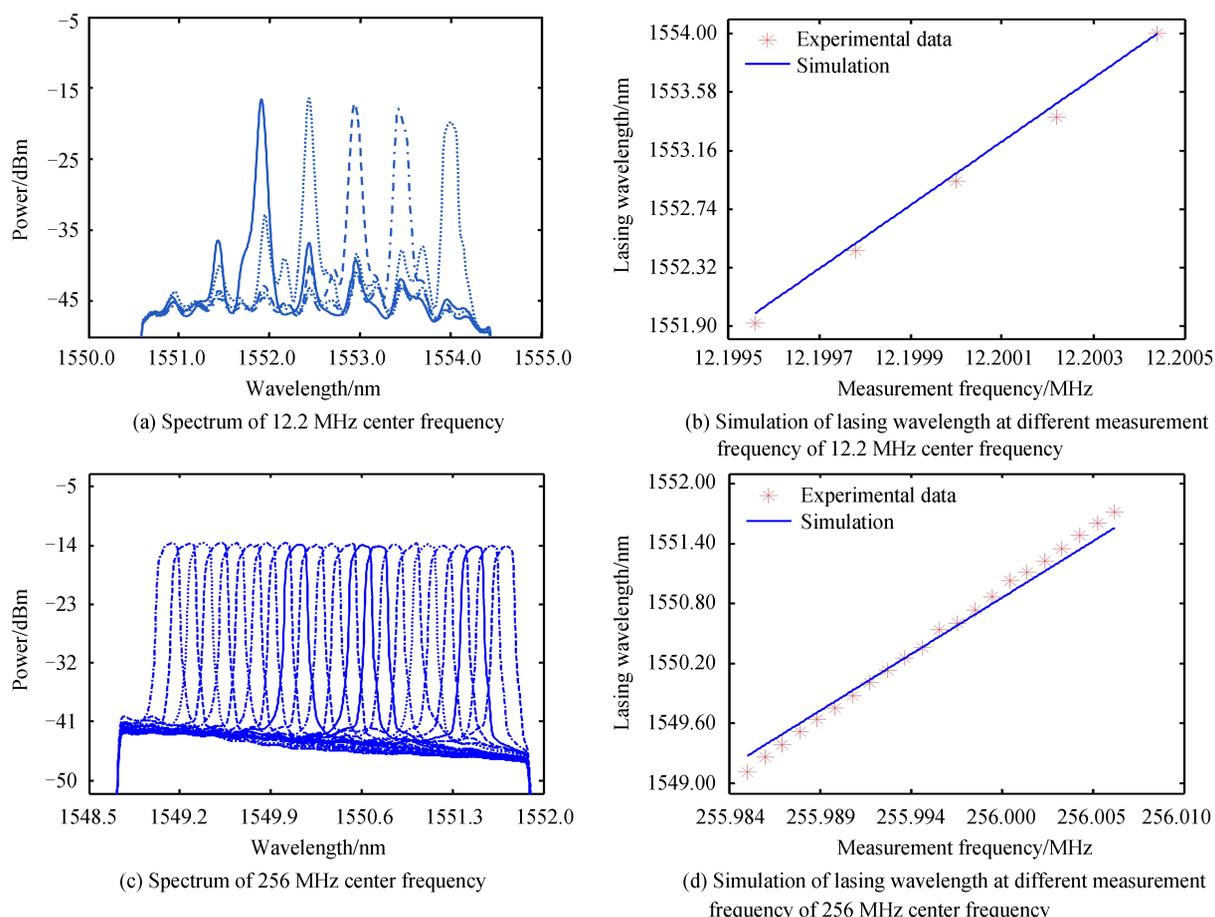


图8 基于长光纤结构的激光器的输出光谱以及输出频率与输出波长的关系

Fig.8 Spectra and relation between lasing wavelength and measurement frequency based on DCF

像看出,在一个腔基频范围内,输出波长与频率存在一一对应的线性关系,实验数据与理论模拟具有较好一致性,仿真中腔长为根据腔基频估算所得,所以仿真所得直线与数据存在偏差。

综上,通过长光纤结构的频率测量实验可以得出,在频率范围内,当输入的中心频率不同时,在同一结构下,测量灵敏度不同,随着测量频率的增加测量灵敏度明显减小,与理论指导相一致。然而,当测量频率逐渐增大时,长光纤结构已经无法满足所需的测量需求,因此进一步提出了基于啁啾光纤光栅色散模块的短腔激光器结构。

## 2.2 基于线性啁啾布拉格光纤光栅结构的频率测量实验

图9为使用线性啁啾布拉格光栅(Linearly Chirped Fiber Bragg Grating, LC-FBG)引入腔内色散的实验装置结构示意图,将长色散光纤更换为啁啾布拉格光纤光栅后激光器腔长大大缩短,LC-FBG色散模块(DCMCB-SN-80-H-1-LP, Proximion)的色散总量为 $-1\ 321\ \text{ps}/\text{nm}$ 。设置TOF带宽为 $2.3\ \text{nm}$ ,中心波长为 $1\ 552\ \text{nm}$ 。使用此结构测量了中心频率分别为 $682\ \text{MHz}$ 和 $1.118\ 7\ \text{GHz}$ 时频率随机变化情况下激光器的输出光谱。

图10为基于LC-FBG的频率测量实验的结果分析,色散总量 $D_{\text{total}}=-1\ 321\ \text{ps}/\text{nm}$ ,取腔内折射率 $n=1.468\ 2$ ,腔长 $L=59.92\ \text{m}$ ,测得腔基频为 $3.41\ \text{MHz}$ 。

图10(a)为中心频率为 $682\ \text{MHz}$ ,频率随机变化情况下的输出光谱图,图10(b)中红色星型为实验数据,蓝色实线为根据式(3)与实验参数仿真得到的曲线,其中谐波锁模阶数 $N=197$ ,测量灵敏度 $S=3.25\times 10^{-7}\ \text{nm}/\text{Hz}$ 。图10(a)可以看出随着频率的变化,有稳定的单波长光谱输出,且随着频率的改变,输出波长改变。图10(b)可以看出频率与波长有很好的——对应关系,且与理论偏差不大。

图10(c)为中心频率 $1.118\ 7\ \text{GHz}$ ,频率随机变化的输出光谱图,图10(d)中红色星型为测得的波长与频

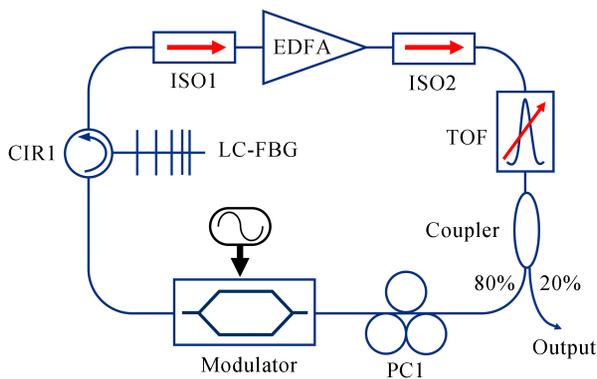


图9 基于LC-FBG引入色散的频率测量结构示意图

Fig.9 Schematic diagram of the proposed frequency measurement setup based on LC-FBG

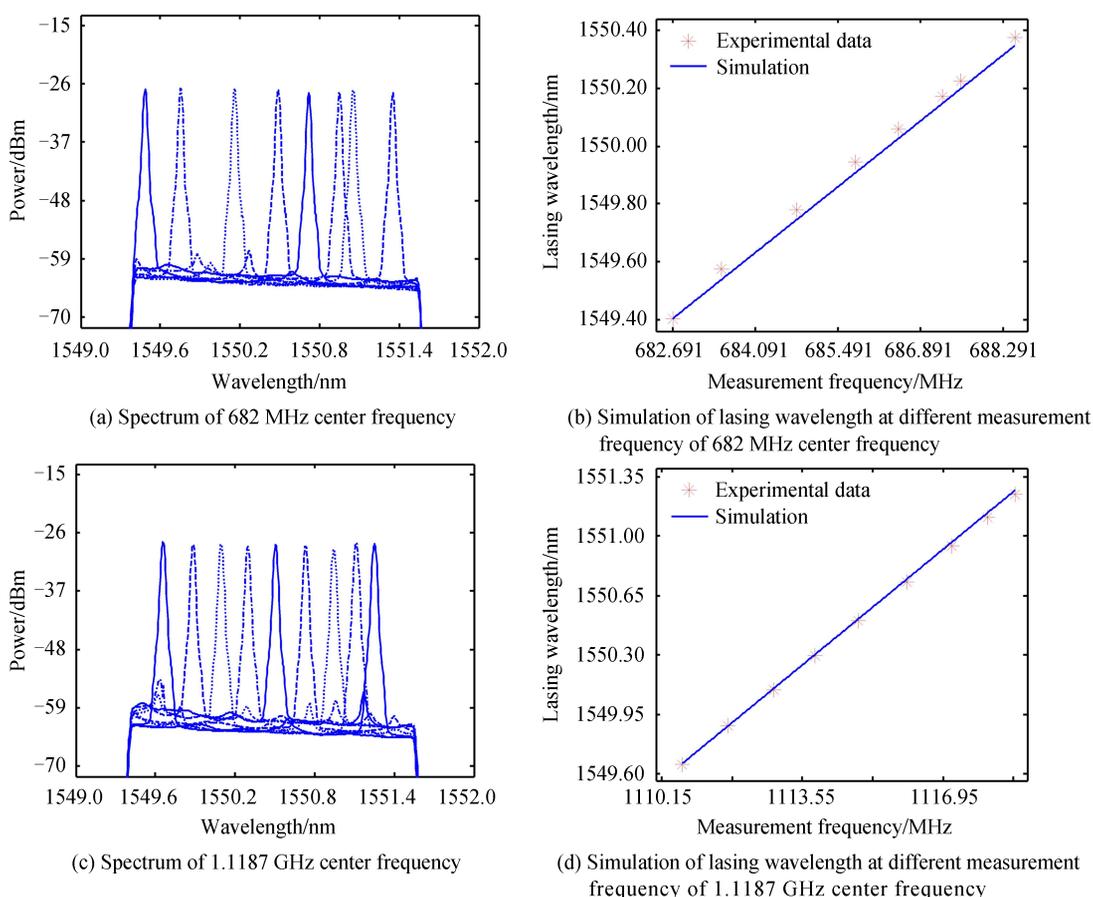


图10 基于LC-FBG的激光器的输出光谱以及输出频率与输出波长的关系

Fig. 10 Spectra and relation between lasing wavelength and measurement frequency based on LC-FBG

率实验数值,蓝色实线为根据式(3)与实验参数仿真得到的曲线,其中谐波锁模阶数 $N=338$ ,测量灵敏度 $S=1.99 \times 10^{-7} \text{ nm/Hz}$ ,输出波长与频率成线性关系,且实验数据与仿真分析偏差不大.根据实验结果与过程可见,与使用光纤的测量结构相比,使用LC-FBG的测量结构在测量高频率时更为适合,因此,使用光栅的短腔长结构更适合待测频率高频率偏移量大的场合.

通过对实验数据和实验现象的分析,结论与理论分析相一致,待测频率与输出波长呈线性关系,且在测量范围内结果具有唯一性,可以利用此原理进行频率偏移测量.分别使用DCF与LC-FBG进行了实验,以验证不同的参数系统在不同应用场合的差别,根据实验结果分析,可以得出在测量范围方面,因为LC-FBG具有短腔长大色散量的特点,所以使用LC-FBG时测量范围要大于使用DCF时,但是随着测量频率的增

大,使用LC-FBG时测量灵敏度明显低于使用DCF时,所以LC-FBG更适用于测量范围大,测量频率高,但灵敏度需求不大的情况,DCF更适用于测量范围不大,测量频率较低,且灵敏度需求高的情况.因此可以根据测量环境的需求,选择引入色散的器件和方式,也可以选择光纤与LC-FBG同时使用.

在实验中存在输出波长不连续的情况,这是由于锁模激光器的特性造成的,待测频率需为腔基频整数倍,导致输出波长的变化不连续.因为腔内引入大量色散,不同波长对应不同的腔基频 $F=F_0+k\Delta F$ ( $k$ 为正整数),其中 $\Delta F$ 为相邻腔基频差值.当待测频率的变化为腔基频差值的整数倍时,满足锁模条件,此时该频率对应的波长起振,所以输出波长的最小离散量为腔基频的最小差值,由色散总量和腔长决定.并且,即使输入频率不为腔基频的整数倍,亦有对应最近的整数倍腔基频的波长输出,不会有空白信号情况.本系统设计相对灵活,根据所测量情况,通过对数值的计算和设计,可以将离散造成的影响减小,如轨道高度为600 km的卫星系统,载波频率为2 GHz,最大多普勒频移为45.19 kHz<sup>[16]</sup>,经计算可以将腔基频差值设计为0.01 kHz,即使频率变化为腔基频差值的整数倍时亦能满足系统要求精度.

需要提及的是,对于更大的载波频率在原理上本系统是可以实现的,该技术的实验论证受到了实验条件的限制,例如,通过1.3节以及实验部分可以看出随着待测频率的增加灵敏度有所下降,主要是因为本实验使用光谱仪作为测量仪器,所以受到光谱仪0.02 nm分辨率的限制,因此实验中进行了最大频率1.118 7 GHz的测量.在实际测量中,通过与边缘检测<sup>[17-18]</sup>和差分解调技术方法结合,无需光谱仪仅测量差分功率比的大小即可实现频率及频偏测量,可大大降低系统成本;实际应用中结合频移反馈系统,可进行多普勒频移的自动补偿.

### 3 结论

本文以色散调谐锁模技术为基础提出了一种新型频率测量方法,通过对激光器输出波长数据的采集分析,可获得对特定频率的频率偏移量,进而可应用于多普勒频移的测量.通过模拟仿真,分析了系统参量对频率测量特性的影响,并在理论指导下,针对不同应用场景设计了两种大色散谐振腔结构,实现了多种载波中心频率情况下的频率测量.所提出的测量技术的原理区别于传统微波光子测量技术,结构更简单,设计更灵活.实验结果证明了本方法的可行性,该技术在雷达、移动通信、卫星通信和导航系统等领域中具有潜在的应用价值.

#### 参考文献

- [1] LI Xiao-yan, WEN Ai-jun, CHEN Wei, *et al.* Photonic Doppler frequency shift measurement based on a dual-polarization modulator[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(8): 2084-2089.
- [2] 佟学俭, 罗涛. OFDM移动通信技术原理与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [3] HUANG Ai-jun, DAI Hong. Doppler frequency shift characteristics analysis of high dynamic satellite communication link [J]. *Telecommunication Engineering*, 2020, **60**(3): 263-267.  
黄爱军, 代红. 高动态卫星链路多普勒频移特性分析[J]. 电讯技术, 2020, **60**(3): 263-267.
- [4] YI Chong-yin, CHI Hao, JIN Tao, *et al.* A PM-based approach for Doppler frequency shift measurement and direction discrimination[J]. *Optics Communications*, 2020, **458**: 124796.
- [5] LU Bing, PAN Wei, ZOU Xi-hua, *et al.* Wideband Microwave Doppler frequency shift measurement and direction discrimination using photonic I/Q detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(20): 4639-4645.
- [6] KANG Bo-chao, FAN Yang-yu, WANG Wu-ying, *et al.* 6~40 GHz photonic microwave Doppler frequency shift measurement based on polarization multiplexing modulation and I/Q balanced detection[J]. *Optics Communications*, 2000, **456**: 124579.
- [7] ZHANG Kun, QIN Hong-tao, ZHAO Shang-hong, *et al.* Photonic approach to wideband Doppler frequency shift estimation system based on a DPMZM and a Sagnac loop[J]. *Optik*, 2019, **182**: 219-226.
- [8] ZOU Xi-hua, LU Bing, PAN Wei, *et al.* Photonics for microwave measurements[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, **10**(5): 711-734.
- [9] ZOU Xi-hua, LI Wang-zhe, LU Bing, *et al.* Photonic approach to wide-frequency-range high-resolution microwave/millimeter-wave Doppler frequency shift estimation[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2015, **63**(4): 1421-1430.
- [10] LU Bing, PAN Wei, ZOU Xi-hua, *et al.* Wideband Doppler frequency shift measurement and direction ambiguity resolution using optical frequency shift and optical heterodyning[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(10): 2321.
- [11] LU Bing, PAN Wei, ZOU Xi-hua, *et al.* Wideband microwave Doppler frequency shift measurement and direction

- discrimination using photonic I/Q detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34**(20): 4639-4645.
- [12] YUICHI N, SHINJI Y. Wide and fast wavelength-tunable mode-locked fiber lasers based on dispersion tuning at 1.5  $\mu\text{m}$  and 1.3  $\mu\text{m}$  bands[C]. Conference on Optical Fiber Communication-incudes Post Deadline Papers, IEEE, 2009, 1-3.
- [13] SHINJI Y. Wide and fast wavelength-swept mode-locked fiber laser based on dispersion tuning and its application to dynamic FBG sensing[J]. *IEEE Technical Report*, 2008, **107**: 39-43.
- [14] YAMASHITA S, ASANO M. Wide and fast wavelength-tunable mode-locked fiber laser based on dispersion tuning[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(20): 9299-306.
- [15] TAKUBO Y, YAMASHITA S. High-speed dispersion-tuned wavelength-swept fiber laser using a reflective SOA and a chirped FBG[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(4): 5130-9.
- [16] 王娜娜. 基于5G的低轨宽带卫星移动通信系统同步技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [17] YANG Na, DU Jun, QU Yan-chen, *et al.* Research on a combination of two kinds of phase-modulated laser Doppler shift measurement methods[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(4): 0412003.  
杨娜, 杜军, 曲彦臣, 等. 一种结合两类相位调制激光多普勒频移测量的方法[J]. 光子学报, 2018, **47**(4): 0412003.
- [18] QU Yan-chen, DU Jun, ZHAO Wei-jiang, *et al.* A kind of phase modulation laser Doppler shift measuring method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(11): 134-140  
曲彦臣, 杜军, 赵卫疆, 等. 一种相位调制激光多普勒频移测量方法[J]. 光子学报, 2014, **43**(11): 134-140