

基于匹配干涉仪的光纤环形激光相干坍塌抑制

马明祥^{1*}, 徐馥芳¹, 李莹颖¹, 胡青青¹, 罗玉昆¹, 徐攀^{2**}

¹国防科技创新研究院, 北京 100071;

²国防科技大学气象海洋学院, 湖南 长沙 410073

摘要 跳模会导致单波长光纤环形激光器相干性有不同程度的退化,严重影响光学系统的性能。设计一种基于匹配干涉仪的相干坍塌抑制方案,分析抑制机理。并分别搭建臂差可调的空间光匹配干涉仪(SLMI)和全光纤结构匹配干涉仪(AFMI),通过实验对抑制效果进行方案验证。结果表明:当 SLMI 的等效臂差不断逼近理论值时,可监测到多模匹配干涉现象,该现象等效于单纵模激光干涉,从而实现相干坍塌抑制;AFMI 结构紧凑,便于嵌入光纤相干探测系统中,能有效抑制随机跳模引入的相干坍塌和相位噪声谱级的大幅上升,降低系统虚警概率。作为一种被动手段,匹配干涉仪对抑制或规避模式失稳引起的相干坍塌具有指导意义。

关键词 激光技术; 光纤环形激光器; 跳模; 相干坍塌; 匹配干涉

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0314001

Coherence Collapse Suppression of Fiber Ring Laser Using Matched Interferometer

Ma Mingxiang^{1*}, Xu Fufang¹, Li Yingying¹, Hu Qingqing¹, Luo Yukun¹, Xu Pan^{2**}

¹National Innovation Institute of Defense Technology, Beijing 100071, China;

²College of Meteorology and Oceanology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Mode hopping causes varying degrees of degradation in the coherence of single-wavelength fiber ring lasers, which seriously affects the performance of optical systems. In this work, a method for coherence collapse suppression based on a matched interferometer is designed, and the suppression mechanism is analyzed. A space-light matched interferometer (SLMI) with adjustable arm difference and an all-fiber matched interferometer (AFMI) are constructed separately, and the suppression effect is verified experimentally. Experimental results show that when the equivalent arm difference of the SLMI continuously approaches the theoretical value, multi-mode-matching interference can be monitored. This is equivalent to single-longitudinal-mode laser interference, thereby successfully suppressing coherence collapse. The AFMI is compact and easy to incorporate into a fiber coherence detection system. It is found that the AFMI can effectively suppress the coherent collapse and the sharp increase of phase noise spectrum level introduced by random mode hopping; this helps to reduce the false alarm probability of the system. As a passive method, matched interferometers play a significant role in suppressing or evading coherence collapse caused by mode instability.

Key words laser technique; fiber ring laser; mode hopping; coherence collapse; matching interference

OCIS codes 140.3510; 140.3560; 140.3425; 140.3570

1 引 言

单波长光纤环形激光器的输出具有窄线宽、高相干、低噪声、宽带可调谐等特性,在光纤传感、光通信、光谱学、引力波探测、微波光子等领域中的应用前景广泛^[1-4],引起了极大的关注。相对线形腔而

言,光纤环形激光器的谐振腔通常较长,纵模间隔较小(一般为 10 MHz 量级),激光增益或损耗带宽内寄居着大量密集本征纵模,且在一定控制参数下表现出复杂的频域动力学特性^[5-6]。为实现单波长单纵模起振输出,通常利用粗滤波与精选模相结合的机制在频域内进行降维处理,典型的方案包括内嵌

收稿日期: 2019-08-29; 修回日期: 2019-09-24; 录用日期: 2019-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(11904408,41904167)

* E-mail: guodongmamx@163.com; ** E-mail: hbpanpan@163.com

超窄通带滤波器、饱和吸收体以及复合腔结构等^[7-12]。其中,自组织反馈掺铒光纤环形激光器(EDFRL)为一类重要的光纤激光器,它利用腔内未泵浦铒纤的饱和吸收效应形成超窄带自组织动态光栅^[8,13],起到精细选模与压缩线宽的作用,理论上可保证单纵模输出。测试发现,实际运行的自组织反馈 EDFRL 能保持相对稳定的单纵模输出,然而受各种因素影响,如平台微振动、环境温漂、光纤内光热效应等,长时工作偶尔会发生跳模现象,无法避免且难以预测,在某些情况下,如腔长慢漂或抽运调制,还会发生触发跳模现象^[14-15]。

事实上,跳模往往会造成单波长单纵模光纤环形激光器输出的光频突变,在跳模过程中,模式竞争会导致光源相干坍塌(相干性退化),并会引入额外光场噪声,进而严重影响光学系统的综合性能^[16-17],制约光源效能的发挥和实际应用。本文设计出一种基于匹配干涉仪的光纤环形激光相干坍塌抑制方案。分析相干坍塌的抑制机理,分别搭建空间光匹配干涉仪(SLMI)和全光纤结构匹配干涉仪(AFMI),并通过实验对由自组织反馈 EDFRL 多模振荡、跳模现象引入的相干坍塌和相位噪声的抑制效果进行验证和评估,从而实现了对相干坍塌的有效抑制。

2 基本原理

单纵模光纤环形激光器的模式失稳现象主要包含跳模与临时多模振荡(模式指纵模),从整个过程来看,临时多模振荡是一种非稳态的多模振荡,可看成一种复杂的跳模现象。跳模现象随机发生,跳模时参与模式竞争的模式数量为两个或更多,跳模间距是纵模间隔的任意整数倍,表现形式复杂多变,会对光源相干性产生不利影响,导致不同程度的相干坍塌^[17]。模式失稳过程中,激光器的输出为多个模式光场的线性叠加,光场谱密度函数表示为

$$G(\nu) = \sum_{i=1}^m I_i(t) \delta(\nu - \nu_i), \quad (1)$$

式中: $I_i(t)$ 、 ν_i 分别为第 i 个模式的辐射强度、频率; m 为模式数量。模式失稳过程中,光源复相干度^[18]表示为

$$\gamma(\tau) = \frac{\int_0^{\infty} G(\nu) \exp(-j2\pi\nu\tau) d\nu}{\int_0^{\infty} G(\nu) d\nu}, \quad (2)$$

式中: τ 为光源输出两光束之间的时延。则光源的时间相干性函数可以写为

$$|\gamma(\tau)| = \frac{\left[\sum_{i,j} I_i(t) I_j(t) \cos(2\pi\Delta\nu_{ij}\tau) \right]^{1/2}}{\sum I_i(t)}, \quad (3)$$

式中: $\Delta\nu_{ij} = \nu_i - \nu_j$, 表示任意两个纵模的频差,为纵模间隔 $\Delta\nu_0$ 的整数倍。

根据(3)式可知,当时延 τ 满足匹配条件(q 为整数)时,即

$$\Delta\nu_{ij}\tau = q, \quad (4)$$

光源相干性 $|\gamma(\tau)|$ 的值等于 1。然而测试发现,当激光器模式失稳时,模式竞争行为往往十分复杂,模式结构(包括模式数量、强度与频率)随机演化,使得(4)式这一苛刻条件极难满足。其他情况下, $|\gamma(\tau)|$ 值均小于 1,即光源因多模竞争会产生不同程度的相干坍塌。根据(3)式和(4)式可知,当 $\Delta\nu_0\tau$ 取整数时,理论上可规避或抑制相干坍塌。

在光纤相干探测系统中,光纤干涉仪一般采用非平衡结构,当光纤 Michelson 干涉仪两臂光程差对应的时延($\tau_0 = 2nl_0/c$)满足(4)式时,本文称其为匹配干涉仪。其臂差 l_0 满足

$$l_0 = k_0 \frac{c}{2n\Delta\nu_0}, \quad (5)$$

式中: n 为干涉仪两臂光纤的纤芯折射率; c 为真空光速; $\Delta\nu_0$ 为激光器的纵模间隔; k_0 为整数。采用相位调制器对匹配干涉仪的一臂施加余弦调制,形成相位载波(PGC)^[19]。激光器处于单纵模状态时,干涉仪输出周期性干涉条纹,模式失稳时,参与模式竞争的各模式通过干涉仪分别产生一个相应的子干涉条纹。则匹配干涉仪输出的结果为各模式的子干涉条纹的非相干叠加,经光电转换后表达式为

$$I = \sum_{i=1}^m A_i(t) + \sum_{i=1}^m B_i(t) \cos[C \cos \omega_0 t + \varphi_i(t)], \quad (6)$$

式中: $A_i(t)$ 与 $B_i(t)$ 分别为正比于第 i 个模式光强的变量; C 为相位调制深度; ω_0 为调制角频率; $\varphi_i(t)$ 为第 i 个模式经匹配干涉仪的相位工作点。任意两个模式经匹配干涉仪的相位工作点之差为

$$\Delta\varphi_{ij} = \frac{4\pi n l_0}{c} \Delta\nu_{ij} = 2\pi \Delta\nu_{ij} \tau_0. \quad (7)$$

根据(4)式和(5)式可知, $\Delta\varphi_{ij}$ 为 2π 的整数倍,(6)式简化为

$$I = \sum_{i=1}^m A_i(t) + \sum_{i=1}^m B_i(t) \cos[C \cos(\omega_0 t) + \varphi_0(t)] = A + B \cos[C \cos(\omega_0 t) + \varphi_0(t)], \quad (8)$$

式中: A 、 B 为正比于所有模式光强之和的常量, B

与 A 之比为干涉条纹可见度; $\varphi_0(t)$ 为任一模式经匹配干涉仪的相位工作点。(7)式和(8)式说明,由于各模式经匹配干涉仪具有相同的相位工作点,无论纵模结构如何演化,多个纵模经匹配干涉仪的子干涉条纹的线性叠加效果等效于单纵模激光干涉,因而对干涉条纹可见度不产生影响。匹配干涉仪的干涉条纹可见度反映了两臂内时延为 τ_0 的传输光之间的相关性,该相关性等同于激光器输出光在时延 τ_0 处的时间相干性 $|\gamma(\tau_0)|$ 。理论分析表明,跳模发生时,匹配干涉仪可抑制或规避模式竞争引入的相干坍塌。

3 实验装置及结果分析

根据基本原理搭建一套基于匹配干涉仪的相干

坍塌抑制实验装置,并对抑制效果进行验证与分析。如图 1 所示,待测 EDFRL 输出光经 1×3 耦合器分为三束,将三束光分别接入法布里-珀罗腔扫描干涉仪(SFPI)、两臂光程差为 1 m 的常规光纤干涉仪以及匹配干涉仪中。其中,SFPI 的光谱自由程与精细度分别为 1.5 GHz 与 200,用于监测纵模结构。实验中,将干涉仪一臂部分光纤缠绕在压电陶瓷环(PZT)上,并对其施加相位调制,调制频率为 12.5 kHz。(8)式中 C 值设置为 π ,可保证在相位工作点慢漂情况下,每个调制周期内的干涉信号均能达到最大、最小值。干涉信号经探测器(PD)光电转换后,与 SFPI 的扫描信号、输出信号分别被接入四通道数字示波器(Agilent-MSO7054B, 500 MHz)中进行同步采集。

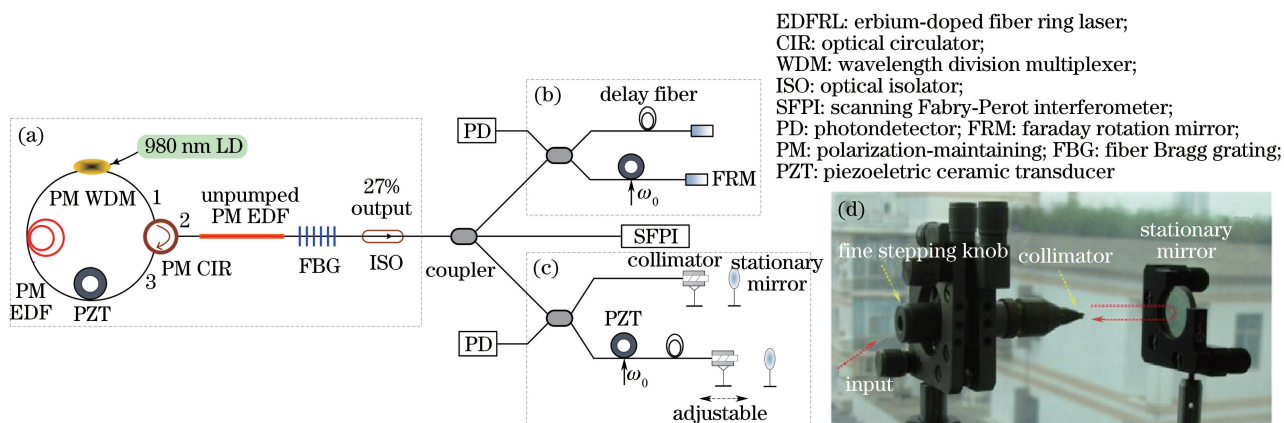


图 1 实验装置。(a) EDFRL 原理示意图;(b)常规光纤干涉仪;(c)空间光匹配干涉仪;(d)匹配干涉仪长臂的反射端

Fig. 1 Experimental setup. (a) Schematic of EDFRL; (b) conventional fiber interferometer; (c) space-light matched interferometer; (d) long-arm reflection end of matched interferometer

常规光纤干涉仪与匹配干涉仪均为 Michelson 干涉仪。前者采用全光纤结构,为抑制偏振衰落,两臂采用法拉第旋镜(FRM)作反射端面^[20];后者采用光纤与空间光传输的复合结构。为便于区分描述,文中将该匹配干涉仪称为空间光匹配干涉仪(SLMI),如图 1(c)所示。匹配干涉仪两臂的传输光经光纤准直器后被平面镜反射,再经准直器耦合进光纤臂中,两臂采用相同的准直器与平面镜,准直器置于基座上的光纤调整架上,短臂准直器与镜面的距离保持不变,长臂准直器与镜面的距离可通过基座和光纤调整架的步进旋钮进行粗调和微调,步进精度分别为 0.1 mm 与 0.1 μm 。

图 1(a)为搭建的 EDFRL 结构原理图,谐振腔内除光纤光栅(FBG)为单模光纤器件外,其他光纤器件为保偏结构。980 nm 半导体激光器通过 980/1550 nm 保偏波分复用器(PM-WDM)为一段保偏

掺铒光纤(1.9 m 长,980 nm 处吸收系数为 18 dB/m)提供泵浦激励;保偏光纤环形器(PM-CIR)保证光在腔内单向传输,端口 2 处连接一段未泵浦、低掺杂的保偏铒纤(1.8 m 长,1536 nm 处吸收系数为 3.9 dB/m),用作可饱和吸收体材料;FBG 中心波长为 1546.8 nm,峰值反射率与 3 dB 带宽分别为 73%、0.12 nm。一定泵浦强度下,起振模式正向传输光与 FBG 反射光相互作用,在未泵浦铒纤内形成驻波干涉,并基于未泵浦铒纤饱和吸收效应形成饱和吸收动态光栅(SADG)^[8,13]。SADG 一旦形成,对起振模式形成自组织反馈,其中心波长在一定范围内可自动跟随该纵模慢漂,并抑制其他边模起振,使激光器保持相对稳定的单纵模振荡。

激光器经 FBG 另一端输出激光,并连接一光纤隔离器(ISO)以消除后向散射光的干扰,输出为线偏振光,偏振消光比测量值为 29 dB,线宽小于

1.3 kHz。通过前期的实验测试发现,该 EDFRL 的模式稳定性及模式状态对泵浦强度具有强烈的依赖性,随泵浦强度逐渐增加,激光器一般经历相对稳定的单纵模区、模式失稳过渡区和阵发多模区,且相邻两区之间无明显界限,详见文献[6]。

为准确测算匹配臂差 l_0 ,需测量 EDFRL 的纵模间隔 $\Delta\nu_0$ 。实验中提升泵浦强度至一定水平,驱使 EDFRL 的输出处于多模振荡频发状态,通过测量分析多纵模间的拍频信号来测得 $\Delta\nu_0$ 。图 2 为 EDFRL 在非稳定多模振荡条件下测得的拍频信号功率谱(平均模式),图中梳状谱线对应的频点均为 $\Delta\nu_0$ 的倍频量,测得 $\Delta\nu_0=18.780$ MHz。该匹配干涉仪所用光纤在 1550 nm 附近的折射率为 $n=1.4680$ 。

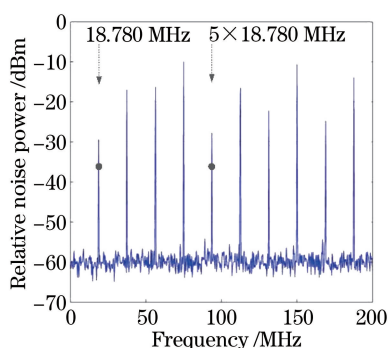


图 2 多纵模之间拍频信号的功率谱

Fig. 2 Power spectrum of beat signal among multiple longitudinal modes

构建匹配干涉仪时,令(5)式中 k_0 值为 1,计算得到 EDFRL 对应的匹配臂差 $l_0=543.71$ cm。理论上, l_0 是指全光纤结构匹配干涉仪的臂差,对于空间光匹配干涉仪,将两臂的总光程差除以 $2n$ 折算为 l_0 。 $\Delta\nu_0$ 与 n 的测量误差分别为 1 kHz、 10^{-4} ,则根据(5)式可推算出 l_0 的测算误差 $\delta l_0=0.66$ mm。另外,干涉仪短臂光纤(包括准直器)量取 100.00 cm,长臂光纤量取 643.70 cm,量取误差均为 1 mm,再加上测算误差 δl_0 、光纤端面切割测量误差与熔接损耗,实验条件下 l_0 的综合误差控制在 3 mm 以内,如图 1 所示,通过微调两臂之间的空间光程差进行误差补偿,以实现匹配干涉实验的验证与特性分析。

实验时提升泵浦强度至一定水平,EDFRL 进入阵发多模区,工作在多模振荡频发的状态,当输出模式结构处于复杂的多模竞争时,光源往往出现相干坍塌现象^[17]。理论上,当 Michelson 干涉仪两臂光程差对应的时延满足(4)式时,可实现多模匹配干涉。为验证多模匹配干涉,如图 1(c)所示,分别利用基座和光纤调整架的步进旋钮对长臂上的准直器与平面镜的距离进行先粗调再微调,从而精细联调两臂的等效臂差。同时监测 EDFRL 输出的模式结构与两干涉仪的干涉条纹信号,当等效臂差实际值不断逼近理论值 l_0 时,即可监测到匹配干涉现象,如图 3 所示。

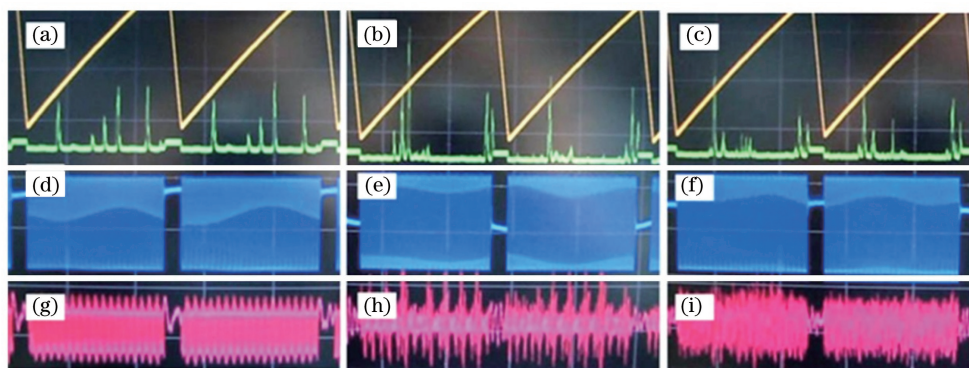


图 3 多纵模振荡下 SLMI 与常规光纤干涉仪的干涉信号。(a)~(c)纵模结构;
(d)~(f) SLMI 的干涉条纹;(g)~(i)常规光纤干涉仪的干涉条纹

Fig. 3 Interference signals of SLMI and conventional fiber interferometer under multiple-longitudinal-mode oscillation.

(a)-(c) Longitudinal mode structure; (d)-(f) interference fringes of SLMI; (g)-(i) interference fringe of conventional fiber interferometer

图 3 表示数字示波器输出的四通道信号,图中从上至下依次为纵模结构、空间光匹配干涉仪和常规光纤干涉仪输出的干涉条纹。高泵浦条件下,EDFRL 常处于非稳态多纵模振荡,如图 3(a)~(c)

所示,瞬态纵模结构演化方式复杂多变,多模竞争剧烈,并对光源相干性与综合性能产生严重影响。图 3(a)显示当前纵模结构相对稳定,同时常规干涉仪输出相对稳定的干涉条纹,如图 3(g)所示,但该

状态难以长时保持,表明 EDFRL 处于准静态多模振荡。图 3(b)、(c)则显示当前纵模结构呈现动态非稳定,结合图 3(h)、(i)可知,EDFRL 处于动态多模振荡,模式竞争激烈。

实验发现,无论 EDFRL 处于临时稳态多模振荡或非稳态多模振荡,经由常规光纤干涉仪输出的干涉条纹往往表现出不同程度的包络坍塌与波动,如图 3(g)~(i)所示。而空间光匹配干涉仪通过微调臂差,可输出相对平稳的干涉条纹,该干涉条纹等效于稳态单纵模输出时的干涉信号,其可见度保持不变且为 1,如图 3(d)~(f)所示。图 3 结果表明,空间光匹配干涉仪的等效臂差已无限逼近理论值 l_0 ,EDFRL 通过空间光匹配干涉仪实现匹配干涉,即认为此时的空间光匹配干涉仪为激光器对应的匹配干涉仪。

在光纤相干探测系统中,EDFRL 设置为中等泵浦水平,一般工作在相对稳定的单纵模状态,然而随机跳模无法避免,跳模现象时有发生。根据图 3 可知,空间光匹配干涉仪能有效规避相干坍塌,但采用的部分空间光学结构体积较大、结构复杂,难以实际应用。本文搭建了全光纤结构匹配干涉仪,结构与图 1(b)基本相同,可直接嵌入工程用光纤相干探测系统。实验中将 EDFRL 输出分为三束,并分别输入到 SFPI、常规光纤干涉仪(臂差 5 m)和所搭建的全光纤结构匹配干涉仪(理论臂差 543.71 cm)中,两干涉仪均置于声屏蔽装置内。腔内 PZT 对 EDFRL 施加光频快速调谐,经两非平衡干涉仪分别产生相位载波(PGC)。考虑到实际应用需求,全光纤结构匹配干涉仪搭建完毕后臂差无法再调节。基于测算误差、测量误差及熔接损耗等因素,全光纤结构匹配干涉仪实际臂差与理论值存在毫米级误差,需验证评估其对相干坍塌的抑制效果。

对比测试发现,跳模随机发生时,全光纤结构匹配干涉仪能一定程度抑制干涉条纹的包络坍塌与波动。图 4 为典型跳模发生时测得的纵模结构与干涉条纹可见度变化曲线。图 4(a)直观描述了跳模现象,即 EDFRL 从当前模式 1 跳变为模式 2(第一个尖峰表示模式 1,后三个尖峰均表示模式 2)。图 4(b)表示跳模对干涉条纹可见度的影响,间接描述了跳模过程的细节。分析图 4 可知:跳模过程大致发生在 566.5 ms 至 570.5 ms 区间,模式 1 与模式 2 此消彼长,对于常规光纤干涉仪,干涉条纹可见度起伏波动;从 566.5ms 至 569.5 ms,模式 1 在模式竞争中占据主导地位,干涉条纹可见度呈下降坍塌

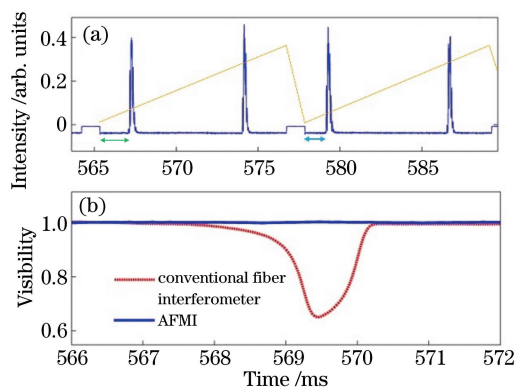


图 4 跳模时纵模结构与干涉条纹可见度。(a)纵模结构; (b)常规光纤干涉仪与 AFMI 的干涉条纹可见度
Fig. 4 Longitudinal mode structure and interference fringe visibility during mode hopping. (a) Longitudinal mode structure; (b) interference fringe visibility of conventional fiber interferometer and AFMI

趋势;在 569.5 ms 附近,干涉条纹可见度坍塌至极小值,此时两模式强度相当;从 569.5 ms 至 570.5 ms,模式 2 强度超越模式 1,使得干涉条纹可见度较快上升至原态,模式 2 最终取代模式 1。另一方面,对于全光纤结构匹配干涉仪,整个跳模过程中干涉条纹可见度基本保持平稳不变,且跳模前后状态保持一致,模式竞争对其影响甚微,表明全光纤结构匹配干涉仪已有效抑制跳模引入的相干坍塌。

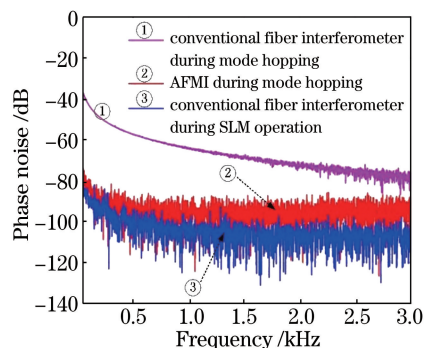


图 5 EDFRL 经非平衡光纤干涉仪的相位本底噪声
Fig. 5 Phase background noise of EDFRL via unbalanced fiber interferometer

事实上,跳模不仅会导致光源发生相干坍塌,同时影响其相位噪声特性。在光纤相干探测系统中,跳模相当于“类冲击信号”作用在干涉仪传感臂上,导致干涉条纹包络坍塌与波动,并使得解调出的相位噪声谱级呈现大幅抬升,造成系统响应“虚警”现象。

图 5 为 EDFRL 经两非平衡光纤干涉仪的典型相位噪声谱级,图中从上至下依次表示常规光纤干涉仪与全光纤结构匹配干涉仪在跳模发生时的相位本底噪声以及常规光纤干涉仪在稳态单纵模运转时

的相位本底噪声。在频点 1 kHz 处,处于稳态单纵模时,常规光纤干涉仪输出的相位噪声为 -104.6 dB(0 dB 为 $1 \text{ rad/Hz}^{1/2}$);跳模发生时,常规光纤干涉仪与全光纤结构匹配干涉仪输出的相位噪声分别为 -64.3 dB、 -101.3 dB,可见全光纤结构匹配干涉仪抑制额外相位噪声达 37 dB。对比发现,跳模时常规光纤干涉仪的相位噪声谱级整体拾升明显,而全光纤结构匹配干涉仪的相位噪声谱级只轻微拾升(上升幅度约为 3 dB),这表明全光纤结构匹配干涉仪在一定程度上能抑制跳模对光源相干性和相位噪声的不良影响,可降低虚警概率。

4 结 论

随机跳模作为一种内部干扰,常导致单纵模光纤激光器产生相干坍塌与各类噪声。对基于匹配干涉仪的相干坍塌抑制问题进行了理论分析与实验研究。理论上,理想的匹配干涉仪能够完全抑制或规避模式失稳与模式竞争引入的相干坍塌;匹配干涉仪的臂差与光源特性密切关联,具有不同纵模间隔的光纤激光器对应需求不同的特定臂差的匹配干涉仪。实验上,臂差精确可调的空间光匹配干涉仪能实现多模匹配干涉,这验证了基于匹配干涉仪有效抑制相干坍塌方案的可行性。搭建了全光纤结构匹配干涉仪,其臂差设计固定不可调、结构紧凑,便于实际传感应用,实测结果表明,全光纤结构匹配干涉仪同样可在一定程度上抑制伴随跳模的相干坍塌和相位噪声,其抑制相位噪声谱级大幅拾升,在频点 1 kHz 处抑制比达 37 dB。综上,匹配干涉仪作为一种被动抑制手段,对规避跳模引入的不利影响具有指导意义,可在相干探测系统工程应用中发挥积极作用。

参 考 文 献

- [1] Ma X X, Lu B L, Wang K L, et al. Tunable broadband single-frequency narrow-linewidth fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0114001. 马选选, 陆宝乐, 王凯乐, 等. 宽带可调谐单频窄线宽光纤激光器[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0114001.
- [2] Feng T, Ding D L, Yan F P, et al. Widely tunable single-/dual-wavelength fiber lasers with ultra-narrow linewidth and high OSNR using high quality passive subring cavity and novel tuning method[J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19760-19768.
- [3] Meng Z, Stewart G, Whitenett G. Stable single-mode operation of a narrow-linewidth, linearly

polarized, erbium-fiber ring laser using a saturable absorber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(5): 2179-2183.

- [4] Honzatko P, Baravets Y, Myakalwar A K. Single-frequency fiber laser based on a fiber ring resonator filter tunable in a broad range from 1023 nm to 1107 nm[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1339-1342.
- [5] Xu P. Study on mode instabilities and synergetic properties of self-organized feedback fiber ring lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013: 75-181. 徐攀. 自组织反馈光纤环形激光器模式非稳定性及协同学特性研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013: 75-181.
- [6] Ma M X, Yang H Y, Xu P, et al. Investigation on characteristics of mode hopping in ultra-narrow linewidth erbium-doped fiber ring laser under pump modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0314002. 马明祥, 杨华勇, 徐攀, 等. 抽运调制条件下超窄线宽掺铒光纤环形激光器的跳模特性研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0314002.
- [7] Chen X F, Yao J P, Zeng F, et al. Single-longitudinal-mode fiber ring laser employing an equivalent phase-shifted fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(7): 1390-1392.
- [8] Cheng Y, Kringlebotn J T, Loh W H, et al. Stable single-frequency traveling-wave fiber loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(8): 875-877.
- [9] Kang M S, Lee M S, Yong J C, et al. Characterization of wavelength-tunable single-frequency fiber laser employing acoustooptic tunable filter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(4): 1812-1823.
- [10] Zhang J L, Yue C Y, Schinn G W, et al. Stable single-mode compound-ring erbium-doped fiber laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(1): 104-109.
- [11] Yang X X, Zhan L, Shen Q S, et al. High-power single-longitudinal-mode fiber laser with a ring Fabry-Pérot resonator and a saturable absorber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(11): 879-881.
- [12] Zhang K, Kang J U. C-band wavelength-swept single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser[J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 14173-14179.
- [13] Xu P, Hu Z L, Jiang N, et al. Transient reflectance

- spectra of adaptive filters based on dynamic population gratings [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 1992-1994.
- [14] Ma M X, Hu Z L, Xu P, et al. Detecting mode hopping in single-longitudinal-mode fiber ring lasers based on an unbalanced fiber Michelson interferometer[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(30): 7420-7425.
- [15] Liang X, Yao Q, Hu Y M, et al. Real-time mode hopping detection on narrow line-width laser source based on unbalanced fiber interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 437-442.
梁迅, 姚琼, 胡永明, 等. 基于非平衡光纤干涉仪的窄线宽激光光源跳模实时测试方法 [J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 437-442.
- [16] Liang X. Investigation of noise analysis and suppression technologies in fiber optic hydrophone system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008: 58-67.
梁迅. 光纤水听器系统噪声分析及抑制技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 58-67.
- [17] Ma M X, Hu Z L, Xu P, et al. Observation of mode instability and coherence collapse in a single-frequency polarization-maintaining fiber ring laser [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(6): 066107.
- [18] Ji J R. Advanced optics tutorial: basic electromagnetism theory in optics [M]. Beijing: Science Press, 2007: 243-246.
季家镛. 高等光学教程: 光学的基本电磁理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 243-246.
- [19] Ni M, Hu Y M, Meng Z, et al. Dynamic range of fiber optic hydrophone using digitized phase generated carrier[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, 42(2): 33-37.
倪明, 胡永明, 孟洲, 等. 数字化 PGC 解调光纤水听器的动态范围 [J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(2): 33-37.
- [20] Ferreira L A, Santos J L, Farahi F. Polarization-induced noise in a fiber-optic Michelson interferometer with Faraday rotator mirror elements [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(28): 6399-6402.