

1550 nm 波段窄线宽高调谐带宽激光光源

古建标^{1,2,3}, 朱福南², 刘磊², 赵思伟², 魏芳², 李璇², 朱韧^{1*}, 侯霞¹, 陈卫标¹

¹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;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

³上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210

摘要 随着空间技术的发展,空间数据传输速率日益成为制约空间科技应用的瓶颈。空间相干光通信技术由于其较高的通信灵敏度、较强的抗干扰能力和较高的保密性成为研究的热点。在空间相干光通信技术中,零差相干光通信体制在理论上具有最好的灵敏度和抗干扰能力,但需要复杂的锁相闭环系统,对本振激光器的线宽和激光频率调谐带宽都提出了很高的要求。在 1550 nm 波段,现有的常规激光器难以同时满足窄线宽和高调谐带宽的要求。为此,采用窄线宽种子源结合外电光调制和窄带光栅滤波的方案,实现了光谱信噪比约为 28 dB、线宽约为 5 kHz、激光频率调谐带宽约为 1.5 MHz 的激光光源输出。

关键词 激光器;窄线宽;高调谐带宽;外电光调制;窄带光栅滤波;零差相干光通信

中图分类号 TN242

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0901003

1550 nm Laser Source with Narrow Linewidth and High Tuning Bandwidth

Gu Jianbiao^{1,2,3}, Zhu Funan², Liu Lei², Zhao Siwei², Wei Fang², Li Xuan²,
Zhu Ren^{1*}, Hou Xia¹, Chen Weibiao¹

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

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³School of Physical Science and Technology, Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China

Abstract With the development of space technology, spatial data transmission rate is becoming a bottleneck associated with its application. Spatial coherent optical communication technology has become a popular research topic in many countries because of its high communication sensitivity, anti-interference ability, and high confidentiality. In this technology, the homodyne coherent optical communication system theoretically exhibits optimal sensitivity and anti-interference ability, but simultaneously requires a complex phase-locked closed-loop system and a local oscillator laser with large linewidth and laser-frequency-tuning bandwidth. In the 1550-nm band, it is difficult for the conventional lasers to simultaneously satisfy the narrow linewidth and high tuning bandwidth requirements. Herein, a narrow linewidth seed source combined with external electro-optic modulation and narrowband grating filtering is used to create a laser source exhibiting a spectral signal-to-noise ratio of approximately 28 dB, a linewidth of approximately 5 kHz, and a laser-frequency-tuning bandwidth of approximately 1.5 MHz.

Key words lasers; narrow line width; high tuning bandwidth; external electro-optic modulation; narrowband fiber grating filtering; homodyne coherent optical communication

OCIS codes 140.3425; 140.3460; 140.3430

收稿日期: 2019-01-11; 修回日期: 2019-03-21; 录用日期: 2019-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61775225)、“十三五”航天领域预研专用技术项目(30501020107HT02)

* E-mail: zrzsiom@163.com

1 引 言

随着空间遥感侦查等应用技术的发展,空间数据呈爆炸式增长,传统的微波通信速率基本接近其极限,已成为限制空间应用技术进一步发展的瓶颈^[1]。高速激光通信技术以其较高的通信速率、较低的资源消耗,以及较高的保密性成了国际上的研究热点^[2]。

在高速激光通信技术中,相较于强度调制/直接探测的方案,相干激光通信技术的灵敏度更高,抗干扰能力更强,特别适合远距离的星间激光通信。在相干光通信系统中,基于光频模拟锁相的零差相干通信方案可实现理论上的最高灵敏度,同时避免了高速数据的采集和处理,是空间高速相干光通信研究的热点^[3],但其需要复杂的锁相闭环系统。在光锁相系统中,激光器的线宽和激光频率调谐带宽都会对锁相效果产生重要影响。为了保证相干光通信的灵敏度,必须保障锁相的精度,这对本振激光器的线宽和激光频率调谐带宽都提出了很高的要求^[4-6]。对于常规的激光器而言,窄线宽和高调谐带宽是相互制约的参量^[7],因此如何同时获得窄线宽、高调谐带宽的激光输出成为了研究的重点。

经过多年的发展,目前常用的窄线宽激光器主要有非平面环形腔固体激光器、单频外腔半导体激光器,以及分布式反馈光纤激光器(DFB)等。其中,非平面环形腔激光器于1985年由Kane等^[8]发明,它采用单块晶体成腔和单向行波振荡,具备优良的线宽特性和稳定性,通过压电陶瓷调谐可以实现约100 kHz的激光频率调谐带宽^[4],但是增益晶体基本局限为YAG晶体,导致可输出的激光波长极少。欧洲数据中继激光通信系统由于采用1064 nm通信波长,因此采用了该激光器方案。中国计量科学院、北京理工大学、中国科学院上海光学精密机械研究所等国内单位也对此种激光器开展了相关研究,实现了激光功率 >1 W,激光线宽为1~2 kHz,压电陶瓷调谐响应时间为45 μ s的输出^[9-11]。美国马里兰大学和RIO公司于2010年提出了平面波导集成外腔半导体激光器方案^[12],解决了常规Littrow和Littman式外腔半导体激光器^[13]的稳定性问题,实现了标准蝶形封装。该激光器在1550 nm波段的激光线宽 <5 kHz,受限于热特性影响,激光频率调谐带宽约为2 kHz,该方案得到了广泛的应用。在国内,武汉光迅公司近年来也实现了蝶形封装的集成外腔半导体激光器,其性能与前述方案基本相

当。DFB是另一种重要的单频激光器,由Assen等^[14]于1995年首先提出,并得到了迅速发展^[15],激光线宽可以达到kHz至亚kHz,激光频率调谐带宽可以达到20 kHz,中国科学院上海光学精密机械研究所、上海交通大学等研究机构对此方案进行了研究,实现了线宽为kHz量级的激光输出^[16-17]。

目前,我国的空间激光通信系统规划的是1550 nm波段。在该波段,目前尚没有可以同时满足窄线宽和高调谐带宽要求的激光器,无论是外腔半导体激光器还是DFB,其调谐带宽一般都在30 kHz以下,不能完全满足光频模拟锁相的需要。2010年,Kanno等^[18]采用单频激光器结合外电光调制的方案来实现超快和宽带的激光频率调谐,该方案采取超高消光比(70 dB)的电光强度调制器,实现了 ± 1 阶调制边带对激光载波达35 dB的强度抑制,但该方案中 ± 1 阶激光的强度一致,在需要单频激光的应用场合仍会降低输出激光的光谱信噪比。为了克服多边带的问题,Wei等^[19]采用注入锁定的方案来提高光谱信噪比,实现了最高达39 dB的光谱信噪比,但是受限于注入锁定的频率对准范围(约为500 MHz)和从激光器的波长温漂系数(约为0.1 nm/ $^{\circ}$ C),该方案对环境的适应性相对较差。另外,由于注入锁定的频率对准情况目前尚无有效的监测手段,因此尚无法对从激光器和注入光波长进行相对锁定。本文的设计采用窄带相移光纤光栅对调制信号光进行窄带滤波,将需要的调制边带滤出,同时为了保证光栅的透射峰和信号光波长实现实时对准,以光栅透射光强为误差信号,对光纤光栅的温度进行了闭环控制。由于光纤光栅的波长漂移系数约为0.011 nm/ $^{\circ}$ C,而光栅的透射区间也可以达到数百MHz,因此该方案对光栅温控精度和使用环境条件的要求都较低,具备较好的环境适应性。采用该方案,本文实现了光谱信噪比约为28 dB,激光线宽约为5 kHz,调谐带宽约为1.5 MHz的输出。未来,通过进一步提高光栅滤波性能或采用光栅级联的方式,还可以进一步提高输出激光的光谱信噪比。

2 基本原理

2.1 电光调制原理

电光调制利用晶体的电光效应,通过电压调制改变光信号的特性,采用的调制器为相位调制器或强度调制器。单频激光器发出某一固定频率的窄线宽激光,通过外加电光调制的方法,可以在此频率基

基础上获得以调制频率整数倍为间隔的多阶边带,当改变外加调制频率的时候,对应边带的频率也会随之改变,从而实现频率调谐。

使用强度调制方式时,取入射光振幅为 E_0 ,调制信号频率为 Ω ,调制深度为 β ,当强度调制器在静态条件下实现理想干涉相消时,输出光为

$$E_{out} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \{1 - \exp[i\beta \sin(\Omega t)]\} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \left[1 - \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \exp(in\Omega t)\right] = \frac{|E_0|}{\sqrt{2}} \exp(i\omega t) \cdot [1 - J_0(\beta) - J_1(\beta) \exp(i\Omega t) + J_{-1}(\beta) \exp(-i\Omega t) - J_2(\beta) \exp(i2\Omega t) + J_{-2}(\beta) \exp(-i2\Omega t) - \dots] = \frac{|E_0|}{\sqrt{2}} \cdot \{[1 - J_0(\beta)] \exp(i\omega t) - J_1(\beta) \exp[i(\omega + \Omega)t] + J_1(\beta) \exp[i(\omega - \Omega)t] - J_2(\beta) \exp[i(\omega + 2\Omega)t] + J_2(\beta) \exp[i(\omega - 2\Omega)t] + \dots\}, \quad (1)$$

式中: t 为时间; n 为阶数; J 为贝塞尔函数。

使用相位调制方式时,输出光为

$$E_{out} = E_0 \exp[i\beta \sin(\Omega t)] = E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \exp(in\Omega t) = |E_0| \exp(i\omega t) \cdot [J_0(\beta) + J_1(\beta) \exp(i\Omega t) + J_{-1}(\beta) \exp(-i\Omega t) + J_2(\beta) \exp(i2\Omega t) - J_{-2}(\beta) \exp(-i2\Omega t) + \dots] = |E_0| \cdot \{J_0(\beta) \exp(i\omega t) + J_1(\beta) \exp[i(\omega + \Omega)t] - J_1(\beta) \exp[i(\omega - \Omega)t] + J_2(\beta) \exp[i(\omega + 2\Omega)t] - J_2(\beta) \exp[i(\omega - 2\Omega)t] + \dots\}. \quad (2)$$

由(1)、(2)式可知,在电光调制产生的多阶边带中,第 n 阶边带的激光频率是入射激光频率和 n 阶调制频率之和,因此通过调谐调制频率即可实现激光频率的调谐。由于电光调制的调谐带宽非常高,因而可以极大地提升激光频率的调谐带宽。多阶边带中 $+n$ 阶和 $-n$ 阶边带的强度相同。图 1 比较了强度调制和相位调制下,不同阶(0 阶、1 阶、2 阶、3 阶)边带的光强对比。

由图 1(a)可知,强度调制器由于理想的相干相消实现了载波抑制,因此在很小的调制深度下,0 阶载波的能量很小,可以实现很高的载波抑制比。由图 1(b)可知,相位调制器没有载波抑制能力,在调制深度很小时,0 阶载波的能量很强。因此,本文采用电光强度调制器作为外电光调制器。

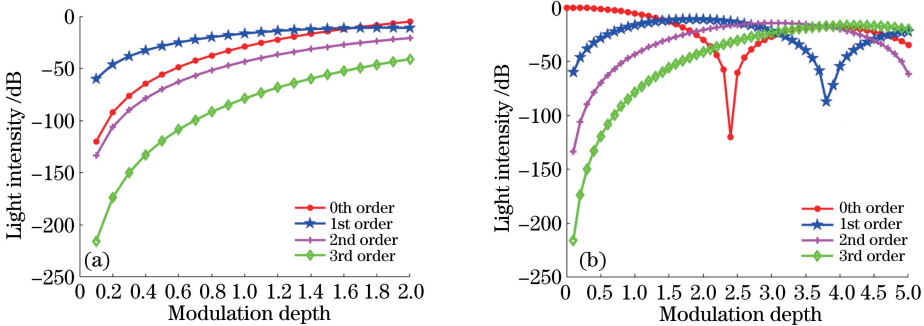


图 1 电光调制下各阶边带光强对比。(a)强度调制;(b)相位调制

Fig. 1 Comparison of light intensity of each sideband under electro-optic modulation.

(a) Intensity modulation; (b) phase modulation

2.2 窄带相移光栅滤波

光纤布拉格光栅的布拉格波长 λ_B 表示为

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (3)$$

式中: n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率; Λ 为光纤布拉格光栅的栅格周期。当光纤光栅所处的环境温度或所受应力发生变化时,光纤光栅的有效折射率 n_{eff}

和周期 Λ 将会发生变化,从而导致光纤光栅的布拉格波长 λ_B 随之发生改变,对应关系为

$$\Delta\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda[(1 - P_e)\epsilon + \xi\Delta T], \quad (4)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为透过波长变化量; P_e 为光纤光栅的有效弹光系数; ϵ 为轴向应变; ξ 为光纤光栅材料的热光系数; ΔT 为环境温度变化。

当光纤光栅所处的环境温度变化时,热膨胀会导致光栅周期 Λ 发生变化,同时,热敏效应也会使光栅的有效折射率 n_{eff} 改变。当忽略应力影响时,光纤光栅的波长偏移量与温度变化之间的关系可以表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \eta)\Delta T, \quad (5)$$

式中:热光系数 $\eta = \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{\Delta T}$,表示光纤折射率随温度的变化关系; Δn_{eff} 为光纤光栅有效折射率变化量;光纤的热膨胀系数 $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\Delta\Lambda}{\Delta T}$,表示光栅栅距与温度的变化关系; $\Delta\Lambda$ 为光纤光栅周期变化量。从(5)式可以看出, $\Delta\lambda_B$ 与 ΔT 呈线性关系,通过控制温度变化 ΔT ,可以对光栅的透射峰进行调谐,调谐系数约为 $0.011 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

相移光纤光栅可以实现很窄的透过带宽,同时具有较高的透过抑制比,因此可以作为窄带滤波器使用。激光器经过电光调制后产生多阶调制边带,使用光纤光栅可以滤出所需要的调制边带,同时将其其他边带滤除,提升系统的光谱信噪比。

2.3 光闭环锁相

为了实现高质量的零差相干通信,需要使用光学锁相技术控制信号光与本振光之间相位误差的方差小于 10° ^[20]。锁相相位误差与本振激光器线宽和锁相环路带宽之间的关系^[21]表示为

$$\sigma_{\theta_e}^2 = \frac{1}{R_{\text{SNR}}^1} \cdot \frac{1-k}{k} \cdot \frac{B_L}{B} + 2.36\Delta\nu \frac{1}{B_L}, \quad (6)$$

$$B_L = \omega_n / (8\xi)(1 + 4\xi^2), \quad (7)$$

式中: $\sigma_{\theta_e}^2$ 为锁相误差的方差; θ_e 为锁相误差; $\Delta\nu$ 为信号光和本振激光器的线宽平均值; B_L 为光学锁相环路噪声带宽; B 为通信速率; k 代表光接收机中光混频器不同通道间的分光比; R_{SNR}^1 为通信信号的信噪比; ω_n 代表锁相环的自由振荡频率; ξ 代表阻尼系数。图 2 表示了激光器线宽和锁相环路带宽对锁相误差的影响。由图 2 可知当激光器线宽为 5 kHz 时,锁相环路带宽必须大于 100 kHz ,以满足锁相误差的要求,然而在常规的光锁相闭环系统中,其环路带宽主要受限于本振激光器的频率调谐带宽。因此,必须提高本振激光器的频率调谐带宽,以满足锁相闭环系统的应用需求。

3 实验研究

3.1 实验方案

系统整体实验方案如图 3 所示,主要由窄线宽

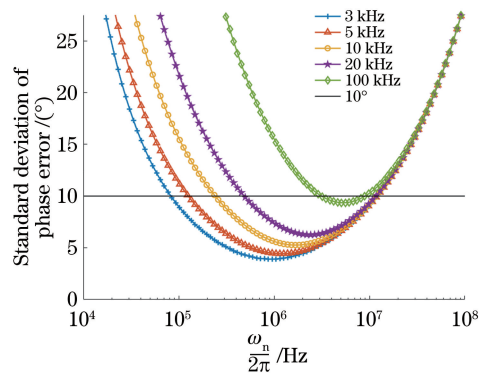


图 2 激光器线宽和锁相环路带宽对锁相误差的影响

Fig. 2 Influences of laser linewidth and phase-locked loop bandwidth on phase-locked error

种子激光器、电光调制器、窄带光栅滤波器和掺铒光纤放大器(EDFA)等组成。

种子激光器选择 RIO 公司生产的集成外腔半导体激光源,激光波长为 1550.84 nm ,激光线宽约为 5 kHz 。种子光首先经过电光调制器(工作带宽为 10 GHz)产生多阶调制边带,调制信号由高频压控振荡器(VCO)产生,调制频率约为 3 GHz ,经过射频驱动器(RF driver,工作带宽为 10 GHz)驱动后加载到调制器上,驱动信号强度按测试的最佳光谱信噪比设置。PIN 管为光电转换器。在电光调制产生的多阶边带中,第 n 阶边带的激光频率是入射激光频率和 n 阶调制频率之和,因此通过调谐调制频率即可实现激光频率的调谐。由于电光调制的调谐带宽非常高,因而可以大大提高激光频率的调谐带宽。

电光调制产生的多阶调制边带经衰减后输入至窄带相移光纤光栅进行滤波,以提高输出激光的光谱信噪比。由于本实验采用的相移光纤光栅耐受功率只有 $200 \mu\text{W}$ (更高的功率会导致光栅相移区热累积,从而导致光栅透射峰波长变化),实验中控制注入光栅的光功率为 $150 \mu\text{W}$,经光栅透射滤波后,激光功率约为 $70 \mu\text{W}$ 。根据实际应用中对光功率的需求,可采用 EDFA 对其进行放大,通过一级单模光纤放大即可实现约 10 mW 的激光输出。

在光锁相系统中,本振光频率需要实时调谐,以实现和信号光的相位锁定。同时,激光器的频率和光栅透射峰都会受环境影响而波动。为了保证光栅透射光功率的稳定,实验中采用光纤光栅反馈控制系统来实时控制光栅的温度和波长,从而始终将光栅透射峰和注入光波长相对锁定,保证输出激光的稳定性。该系统示意图如图 4 所示。

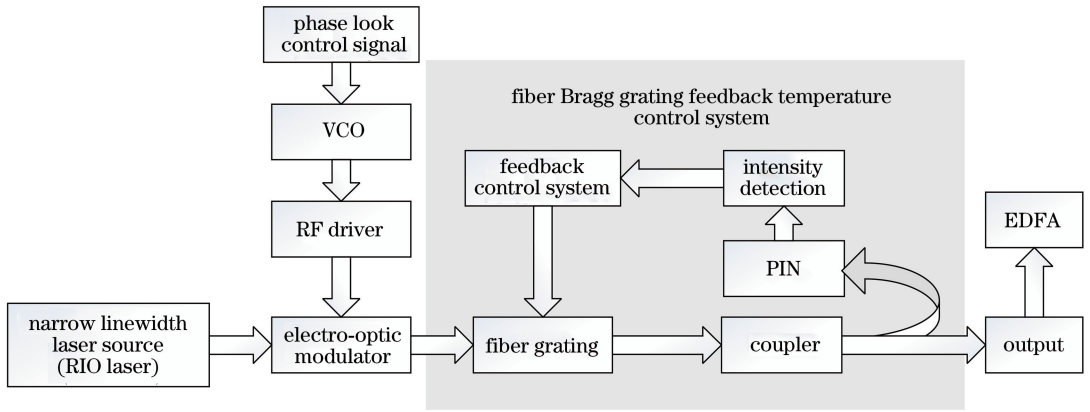


图 3 系统方案示意图

Fig. 3 System scheme diagram

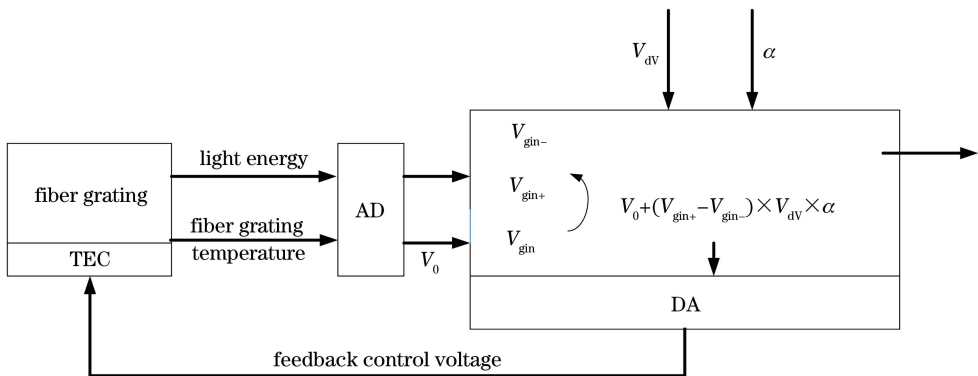


图 4 光纤光栅温度反馈控制系统示意图

Fig. 4 Diagram of fiber grating temperature feedback control system

图 4 中 TEC 为半导体热电制冷器,用来控制光纤光栅的温度;AD 为模数转换器;DA 为数模转换器。当光栅注入光的波长改变时,需要改变光纤光栅的透射峰波长,使其与注入光波长一致,从而实现光谱滤波并保持透射光功率稳定。本实验采用梯度下降算法实现光纤光栅的温度反馈控制。

首先,控制光栅温度围绕注入光波长进行扫描,找到光强最大值,并将对应的光栅温度作为温控的初始设置值 V_0 ,此时采集到的光栅透射光强为 V_{gin} ;然后,设置光栅温控温度增加 V_{dv} ,并采集到对应光栅的透射光强 V_{gin+} ,再设置光栅温控温度减小 V_{dv} ,采集到光强 V_{gin-} ;接下来,在原来的温控电压 V_0 的基础上加上偏移量 $(V_{gin+} - V_{gin-}) \times V_{dv} \times \alpha$ 作为新的温控设置值,其中 α 为控制梯度下降速率系数。不停地重复这个过程,即可以实现光纤光栅透射峰相对注入光波长的锁定。

3.2 窄带相移光纤光栅和光谱对比度

实验中所使用的光纤光栅系采用相位掩模板法在长飞公司生产的 PM1550 光纤上刻蚀而成,光纤光栅长度为 9 mm,周期为 535 nm,相移量为 π ,光

栅波长随温度变化的系数约为 0.011 nm/°C。图 5 为采用高精度光谱仪(AP2040 型, APEX 公司,美国)测试光纤光栅的透射光谱图,可以看出,光栅反射区宽度约为 0.25 nm,中心透射峰对应波长为 1550.8 nm,光栅中心透射峰相对于反射区的透射对比度约为 20 dB。

为获得光纤光栅的透射峰宽度,采用激光波长扫描法进行测试。将激光分为两路,并扫描激光波

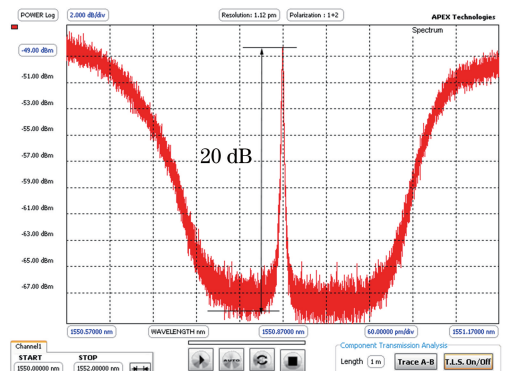


图 5 光栅透射谱

Fig. 5 Grating transmission spectrum

长:一路激光接入波长计实时监测激光波长,另一路接入光栅并通过光电探测器和示波器监测光栅透射光强。测试结果如图 6 所示。根据示波器上透射峰

对应的 3 dB 时间宽度和波长计测量的波长时间调谐系数,可以得到光纤光栅的 3 dB 带宽约为 300 MHz。

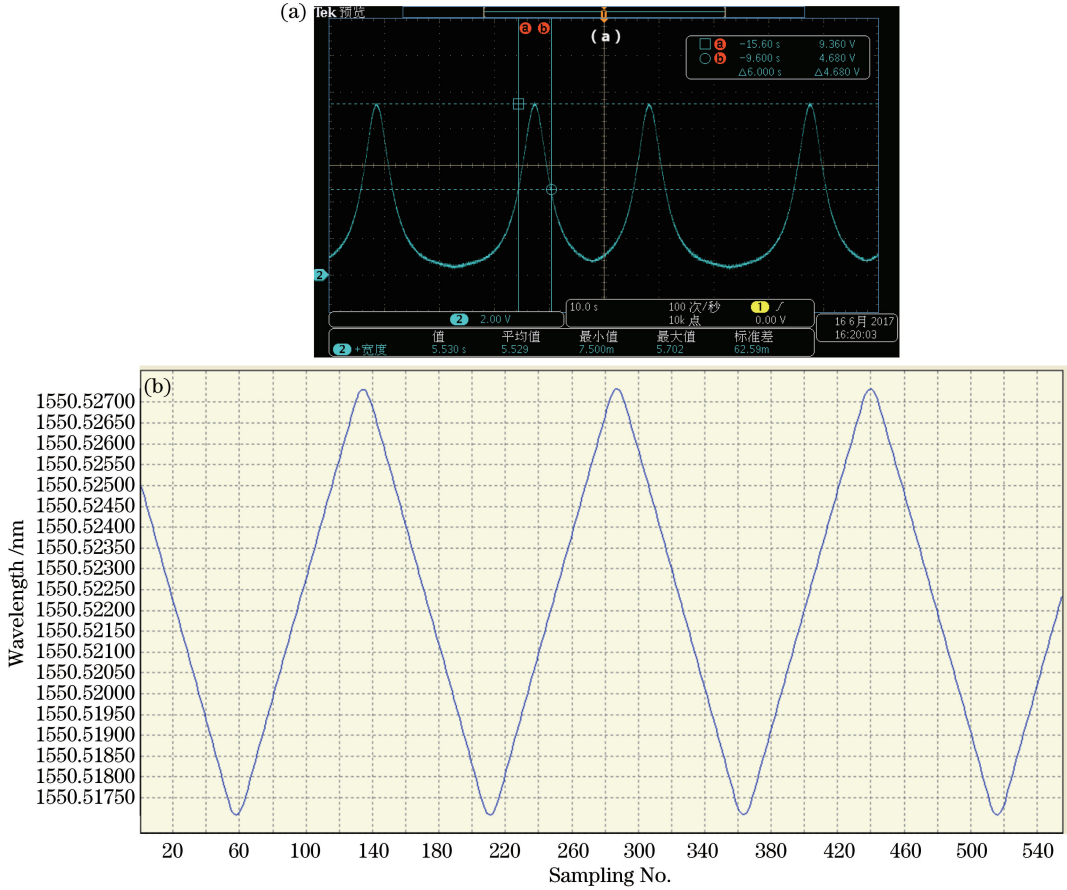


图 6 光纤光栅带宽测试结果。(a)示波器图形;(b)波长计图形

Fig. 6 Test results of fiber Bragg grating bandwidth. (a) Oscilloscope graphic; (b) wavelength meter graphic

图 7 为 RIO 激光器所发出的连续种子光经过电光调制后,经光栅滤波前和滤波后的光谱图。图 7(a)为电光调制后、光栅滤波前的激光光谱;图 7(b)为光栅滤波后的激光光谱。由图 7 可知:在光栅滤波前,不同阶边带的间隔为 24 pm(对应 3 GHz),

同时正负 1 阶调制边带的强度一致,相对于 0 阶激光(对应种子光波长)的对比度为 8 dB;在光栅滤波后,透射边带(对应 -1 阶边带)相对于 +1 阶边带的对比度达到了 28 dB,相对于 0 阶激光的对比度达到了 32 dB,可以满足相干通信的应用需求。对于

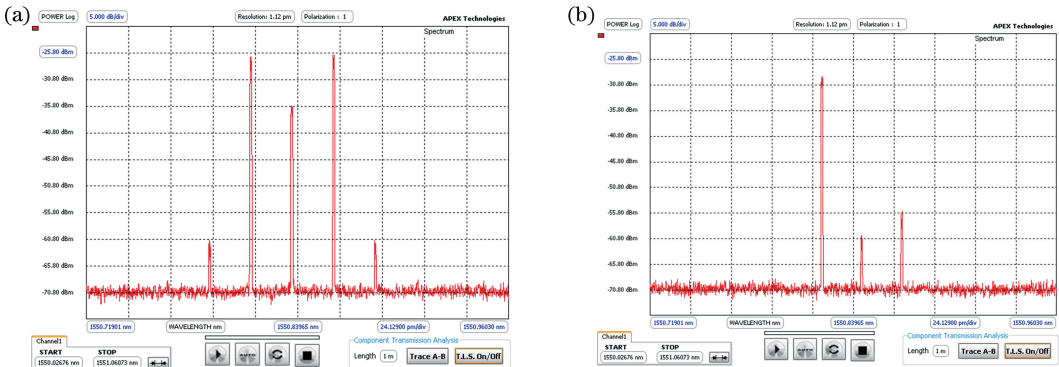


图 7 激光光谱测试图。(a)电光调制后的激光光谱;(b)经过光纤光栅后的激光光谱

Fig. 7 Measured laser spectra. (a) Laser spectrum after electro-optic modulation; (b) laser spectrum after fiber grating

需要更高光谱信噪比的应用场合,可以通过进一步提高光纤光栅的透射对比度,或者采用光栅级联的方式来实现更好的光谱滤除。

3.3 激光功率稳定性和强度噪声

为保障光栅透射后光功率的稳定性,采用光栅反馈控制系统对光栅的温度进行了反馈控制。调制光信号经过光栅后,光栅透射的光强信号通过光电探测器转化为电压信号,如图 8 所示,显示了光栅反馈控制的工作过程。可以看出,当实现温度闭环反馈控制后,光栅透射光强的稳定性良好,保持在光栅最大透过率附近,光强最大抖动量为 2.9%。

对系统输出激光的强度噪声进行测试,并与 RIO 种子源的强度噪声进行对比,相对强度噪声(RIN)测试曲线如图 9 所示。可以看出,与 RIO 激光器相比,系统最终输出的强度噪声有所恶化,主要

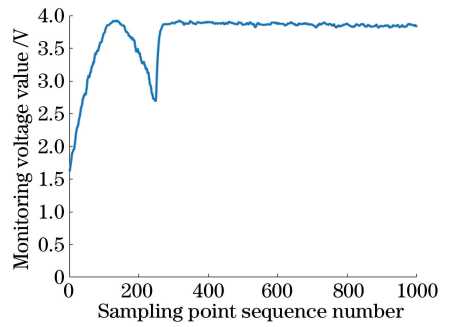


图 8 光栅温度反馈控制工作示意图

Fig. 8 Diagram of grating temperature feedback control

由残余调制边带和 EDFA 的自发辐射噪声引起,但该参数仍能满足相干光通信的应用需求。这是因为,在零差相干光通信中,本振光的强度噪声主要是共模噪声,而由于通信系统采用平衡探测器,因此可以抑制共模噪声的影响^[22-23]。

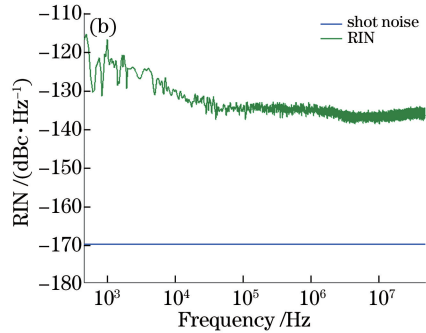
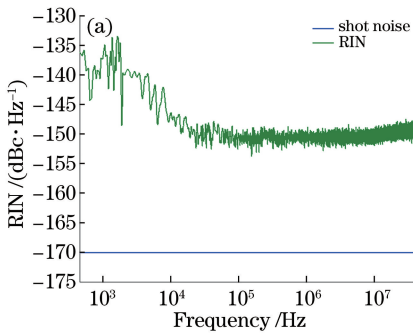


图 9 强度噪声测试曲线。(a)RIO 激光器的强度噪声;(b)系统的强度噪声

Fig. 9 Measured intensity noise curves. (a) Intensity noise of RIO laser; (b) intensity noise of system

3.4 激光调谐带宽和线宽

采用非平衡马赫-曾德尔干涉仪对激光器的调谐性能进行测试,由信号发生器产生不同频率的正弦调制信号,并将该信号分为两路,一路直接接入示波器,另一路加载到 VCO 的频率控制端口,光电探测器将经过非平衡马赫-曾德尔干涉仪后的光电信号转化为电信号,然后接入示波器,统计不同调谐频

率下光电信号的幅度变化,以及光电探测信号和调制信号的延时相位变化,测试结果如图 10 所示。同时,对 RIO 种子源的调谐带宽进行对比测试。

图 10(a)为频率调谐幅度-调谐频率响应曲线:当调谐频率达到 7 kHz 时,RIO 激光器的频率调谐幅度相对低频处(1 kHz)已经下降到 50% 以下;而电光调制光源的频率调谐幅度则比较稳定,在调谐

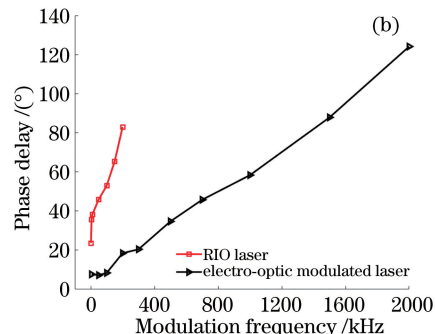
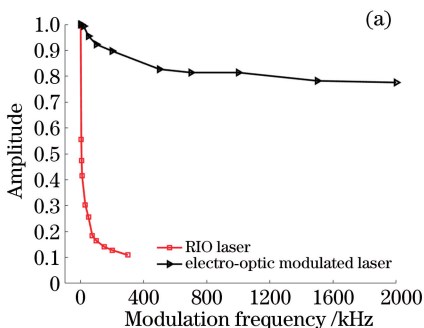


图 10 调谐带宽测试曲线。(a)幅频响应曲线;(b)相频响应曲线

Fig. 10 Measure tuning bandwidth curves. (a) Amplitude-frequency response curve; (b) phase-frequency response curve

频率达到 2 MHz 时,其幅度相对低频处仍保持在 75%以上。图 10(b)为延时相位-调谐频率响应曲线;RIO 激光器由于调谐幅度过低,未进行 300 kHz 以上的测试;当电光调制光源在调谐频率达到 1.5 MHz 时,相位延迟小于 90°,完全可以满足相干通信中模拟光锁相对于激光频率调谐带宽的需求。

采用延时自外差法测试激光光源的线宽,延时光纤长度为 50 km,测试结果如图 11 所示。可以看出,-20 dB 的电信号频谱宽度为 109.5 kHz,对应激光光源的线宽约为 5.5 kHz,和电光调制前的种子源线宽一致,可以满足相干通信中对光源线宽的需求。

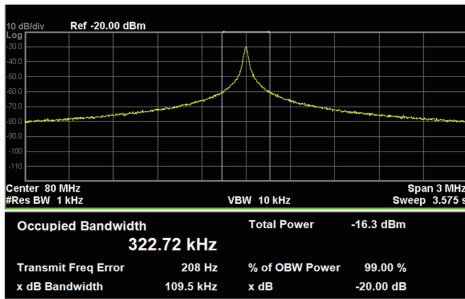


图 11 激光光源线宽

Fig. 11 Linewidth of laser source

4 结 论

采用窄线宽种子激光器和外电光调制技术,结合窄带光栅滤波和 EDFA,实现了 1550 nm 波段窄线宽、高调谐带宽的激光光源,该光源的光谱信噪比约为 28 dB,激光线宽约为 5 kHz,调谐带宽约为 1.5 MHz,经 EDFA 放大输出的光功率约为 10 mW;采用光栅反馈控制系统实现了光栅透射峰和激光波长的相对锁定,并实现了稳定的激光功率(峰-峰值约为 2.9%)。通过进一步提高光栅的滤波性能,或采用光栅级联滤波,还可以进一步提高激光器的光谱信噪比。该激光器在相干光通信领域可以作为本振激光器。

参 考 文 献

[1] Yue C L, Li J W, Sun J F, *et al.* Homodyne coherent optical receiver for intersatellite communication[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(27): 7915-7923.

[2] Pfau T, Hoffmann S, Adamczyk O, *et al.* Coherent optical communication: towards realtime systems at 40 Gbit/s and beyond[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 866-872.

[3] Zhang Z, Sun J F, Lu B, *et al.* Costas optical phase lock loop system design in inter-orbit coherent laser communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0805006.
张震, 孙建锋, 卢斌, 等. 星间相干激光通信中科斯塔斯锁相系统设计[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0805006.

[4] Heine F, Schwander T, Lange R, *et al.* Space qualified laser sources [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6189: 61892I.

[5] Kong Y X, Ke X Z, Yang Y. Bit error rate of laser linewidth in spatial coherent optical communication link[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 040603.
孔英秀, 柯熙政, 杨媛. 激光器线宽对空间相干光通信链路传输误码率研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 040603.

[6] Zhang H Z, Dong Z. Laser linewidth tolerance of pre-equalization technology in coherent optical communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 030605.
张惠忠, 董泽. 相干光通信中预均衡技术的激光器线宽容忍度[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 030605.

[7] Kuo B P P, Radic S. Fast wideband source tuning by extra-cavity parametric process[J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 19930-19940.

[8] Kane T J, Byer R L. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser[J]. *Optics Letters*, 1985, 10(2): 65-67.

[9] Zang E J, Cao J P, Zhong M C, *et al.* Output power and frequency stability of monolithic semi-nonplanar ring lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4914: 281-284.

[10] Gao C Q, Gao M W, Lin Z F, *et al.* LD pumped monolithic non-planar ring resonator single frequency lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(7): 1704-1709.
高春清, 高明伟, 林志锋, 等. LD 抽运单块非平面环形腔单频激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1704-1709.

[11] Zhu R, Zhou J, Liu J Q, *et al.* Solid state tunable single-frequency laser based on non-planar ring oscillator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(11): 1102011.
朱韧, 周军, 刘继桥, 等. 可调谐单频非平面环形腔固体激光器[J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 1102011.

[12] Numata K, Camp J, Krainak M A, *et al.* Performance of planar-waveguide external cavity laser for precision measurements [J]. *Optics Express*, 2010, 18(22): 22781-22788.

- [13] Liu K R, Littman M G. Novel geometry for single-mode scanning of tunable lasers[J]. Optics Letters, 1981, 6(3): 117-118.
- [14] Asseh A, Storoy H, Kringleboth J T, *et al.* 10 cm Yb³⁺ DFB fibre laser with permanent phase shifted grating[J]. Electronics Letters, 1995, 31(12): 969-970.
- [15] Spiegelberg C. Compact 100 mW fiber laser with 2 kHz linewidth[C]//Optical Fiber Communications Conference 2003, March 23, 2003, Atlanta, Georgia, United States. Washington, D. C.: OSA, 2003: PD45.
- [16] Chen J L, Liang L P, Chen B, *et al.* Study on postprocess of $\lambda/4$ -shifted DFB Yb-doped fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(7): 581-584.
陈嘉琳, 梁丽萍, 陈柏, 等. 掺 Yb 相移分布反馈光纤激光器的后期制作与研究 [J]. 中国激光, 2003, 30(7): 581-584.
- [17] Zhu Q, Chen X B, Chen J P, *et al.* DFB fiber laser fabrication by moving phase mask [J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2006(1): 17-20, 29.
朱清, 陈小宝, 陈建平, 等. 相位掩模板移动法制作 DFB 光纤激光器 [J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2006(1): 17-20, 29.
- [18] Kanno A, Honda S, Yamanaka R, *et al.* Ultrafast and broadband frequency chirp signal generation using a high-extinction-ratio optical modulator [J]. Optics Letters, 2010, 35(24): 4160-4162.
- [19] Wei F, Lu B, Wang J, *et al.* Precision and broadband frequency swept laser source based on high-order modulation-sideband injection-locking [J]. Optics Express, 2015, 23(4): 4970-4980.
- [20] Prabhu V K. PSK performance with imperfect carrier phase recovery [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1976, AES-12(2): 275-286.
- [21] Kazovsky L. Decision-driven phase-locked loop for optical homodyne receivers: performance analysis and laser linewidth requirements [J]. Journal of Lightwave Technology, 1985, 3(6): 1238-1247.
- [22] He J K, Zeng X D. Research on balanced optical heterodyne detection and local laser intensity noise suppression [J]. Electronic Science and Technology, 2010, 23(8): 25-31.
何佶珂, 曾晓东. 光外差平衡检测与本振光强度噪声抑制研究 [J]. 电子科技, 2010, 23(8): 25-31.
- [23] Yamashita S, Okoshi T. Suppression of common-mode beat noise from optical amplifiers using a balanced receiver [J]. Electronics Letters, 1992, 28(21): 1970-1972.