

基于光纤光栅 Sagnac 环的可调谐光电振荡器

胡总华,聂奎营,阮毅,许江勇,王文龙

(兴义民族师范学院 物理与工程技术学院,贵州 兴义 562400)

摘要:为了解决光电振荡器频率调谐范围小的问题,提出了一种借助于宽带光源、臂长差可调谐的光纤光栅 Sagnac 环和一段色散光纤,在光电振荡器回路中构建一个频率可调谐的微波光子滤波器,实现光电振荡器输出频率大范围调谐的设计方案。光纤光栅 Sagnac 环的臂长差在 0.50~8.28mm 范围内变化,当最小变化步长为 0.01mm 时,该结构光电振荡器能够实现 0.9915~16.4190GHz 频率范围内的单一频率微波信号输出,频率调谐步长为 19.8MHz,边模抑制比达到 20dB。

关键词:光电振荡器;光纤光栅;Sagnac 环;自由频谱范围;色散光纤

中图分类号:TN929.1 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)06-0017-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.06.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Tunable optoelectronic oscillator based on fiber grating Sagnac loop

HU Zonghua, NIE Kuiying, RUAN Yi, XU Jiangyong, WANG Wenlong

(College of Physics&Engineering Technology, Xingyi Normal University for Nationalities, Xingyi Guizhou 562400, China)

Abstract: In order to effectively solve the problem of small frequency tuning range of the photoelectric oscillator, a design scheme of a frequency tunable microwave photonic filter in the optoelectronic oscillator circuit is proposed, which realizes wide frequency tuning of the output frequency of the optoelectronic oscillator by means of a broadband light source, a Sagnac ring with tunable arm length difference and a section of dispersion fiber. When the arm length difference of fiber grating Sagnac loop varies from 0.50~8.28mm and the minimum change step is 0.01mm, The structure of the photoelectric oscillator can achieve a single frequency microwave signal output in the frequency range of 0.9915~16.4190GHz, with frequency tuning step being 19.8MHz and the side mode rejection ratio being 20dB.

Key words: optoelectronic oscillator; fiber grating; Sagnac loop; free spectrum range; dispersion optical fiber

0 引言

光电振荡器是一种将激光能量转变成微波信号能量的新型微波信号发生装置,它是利用光纤的低损耗、高储能特性配合有源光器件构成正反馈回路,使回路中有源器件产生的某一频率噪声信号满足振荡条件,形成稳定的微波信号输出,是一种高质量的微

波信号源。由于光电振荡器产生的微波信号具有频谱纯度高、相位噪声低等优点,在射频载波通信、军用雷达、星间链路和宽带无线通信系统等领域得到了广泛的应用。近年来,光电振荡器的可调谐性引起了广大科研工作者的兴趣。传统的光电振荡器采用中心频率固定的电滤波器或微波光子滤波器实现振荡模式的选择,限制了光电振荡器输出频率的可调谐性。2002年,Stéphane 等人提出通过改变振荡回路中的色散光纤和模式间隔达到频率调谐的目的^[1],但调谐的范围小,需要更换光纤,实现困难。Liu 等人采用 2 个级联的光纤环实现振荡器模式的选择,通过重构光纤环的长度实现频率调谐^[2],不利于实现光电振荡器输出频率的连续性调谐。Jiang 等人采用一个多波长的光纤激光器^[3],利用色散元件的色散效应和光电调制器构成了中心频率可调的微波光子滤波器,实现了频率从

收稿日期:2018-12-17。

基金项目:贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2017]360、黔教合 KY 字[2017]370) 资助;贵州省科技厅联合基金项目(黔科合 LH 字[2016]7036 号、黔科合 LH 字[2016]7039 号)资助。

作者简介:胡总华(1982-),男,河南南阳人,硕士,副教授,主要从事微波光子技术、光通信器件和激光光束整形与传输等方面的研究工作;主持、参与贵州省教育厅项目 3 项,参与贵州省科技厅联合基金项目 2 项。



6.88~12.79GHz(步长为 0.129GHz)的调谐,但调谐范围有限,限制了其应用范围。Liu 等人通过构建一个色散引起的微波光子带通滤波器^[4],实现了光电振荡器频率从 4.078~13.050GHz 的调谐,但该结构光电振荡器回路中微波振荡模式间隔是固定的,影响其调谐步长。

针对这些问题,本文利用光纤光栅 Sagnac 环切割宽带激光光谱,借助于可调谐光纤延迟线(OVDL),调节光纤光栅 Sagnac 环的臂长差,产生波长间隔均匀且可调的多波长激光束,联合光电调制器和色散光纤构成一个中心频率可调的 FIR 滤波器,实现对光电振荡器振荡模式的选择。

1 系统模型及理论基础

光纤光栅 Sagnac 环是将单个光纤光栅写入 Sagnac 环中,构成具有窄带滤波功能的全光纤器件,如图 1 所示。本文把光纤布喇格光栅写入 Sagnac 环中间位置, L_1 和 L_2 分别是光纤光栅 Sagnac 环两臂的长度,通过光纤耦合器构成一个环路。光波从端口 1 进入,当两臂光程差为 0 时,反射光全部由端口 2 输出;当两臂有较小光程差时,端口 2 的输出光具有窄带梳状光谱分布的特点,是受到余弦调制的光栅反射谱,在光栅反射带宽内形成梳状滤波器,可以用来产生多波长光源^[5]。我们采用 3dB 光纤耦合器和周期均匀的光纤 Bragg 光栅构成的光纤光栅 Sagnac 环,当臂长差 $\Delta L \neq 0$ 时,光纤布喇格光栅的透射率表达式可以表示为^[6]:

$$T = \frac{\sinh^2(\sqrt{k^2 - \delta^2} L_g) \cos^2(\beta \Delta L)}{\cosh^2(\sqrt{k^2 - \delta^2} L_g) - \frac{\delta^2}{k^2}} \quad (1)$$

其中, k 为交流互耦合系数($k = \frac{\pi}{\lambda} \overline{\Delta n_{\text{eff}}}$), δ 为直流自耦合系数($\delta = 2\pi n_{\text{eff}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{2n_{\text{eff}} \Lambda} \right) + \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\Delta n_{\text{eff}}}$), β 为光纤中的模式传播常数($\beta = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda}$), L_g 为光纤光栅的长度, ΔL 为光纤光栅 Sagnac 环的臂长差($\Delta L = L_1 - L_2$), n_{eff} 、 Λ

分别为光纤光栅的有效折射率和周期, $\overline{\Delta n_{\text{eff}}}$ 为折射率调制深度。在采用周期均匀光栅的情况下,光纤光栅 Sagnac 环输出光谱峰值间隔是均匀的,输出光谱的波长间隔 $\Delta\lambda$ 可表示为^[5]:

$$\Delta\lambda = \frac{2n_{\text{eff}} \Lambda^2}{\Delta L} \quad (2)$$

图 2 为 3dB 光纤耦合器和均匀光纤光栅的 Sagnac 环透射光谱图。其中, $\overline{\Delta n_{\text{eff}}} = 7.6 \times 10^{-3}$, $L_g = 2\text{mm}$, $\Delta L = 1\text{mm}$ 。通过改变光纤光栅 Sagnac 环的臂长差来改变输出光谱的通道数,从而改变输出光谱的峰值波长间隔。

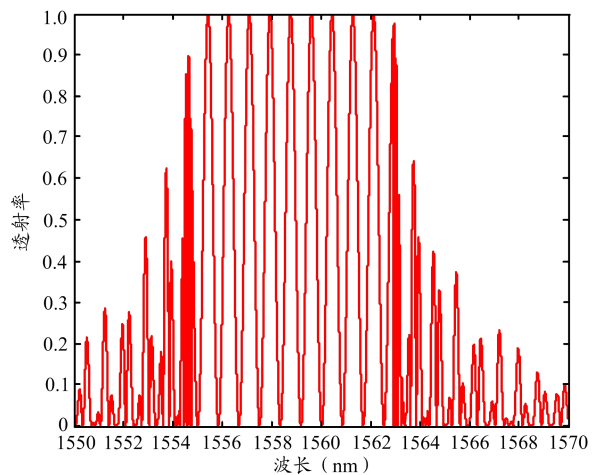


图 2 光纤光栅 Sagnac 环的透射谱

根据式(2)可得光纤光栅 Sagnac 环输出光谱波长间隔与臂长差 ΔL 的关系如图 3 所示。其中, $n_{\text{eff}} = 1.452$, $\Lambda = 534\text{nm}$ 。通过增大光纤光栅 Sagnac 环的臂长差,使光纤光栅 Sagnac 环输出光谱波长间隔逐渐减小;当 $\Delta L > 1.5\text{mm}$ 后,光谱波长间隔随臂长差的增大缓慢减少。当 $\Delta\lambda \geq 0.1\text{nm}$ 时,在光纤光栅反射带宽内,透

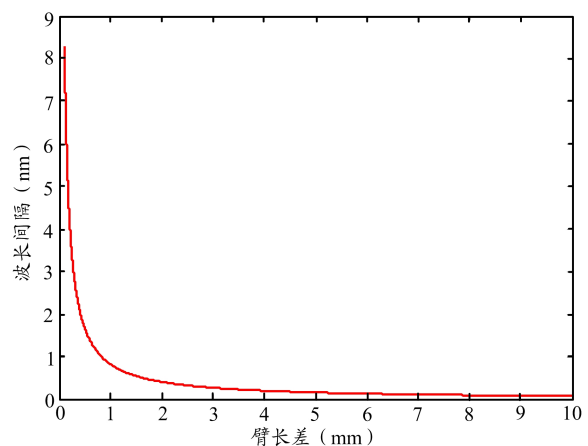


图 3 光纤光栅 Sagnac 环输出光谱波长间隔与臂长差关系

射谱功率的周期性变化能被目前的光学仪器分辨, 因此臂长差 $\Delta L \leq 8.28\text{mm}$ 。由于光纤光栅的带宽有限, 根据选择的光纤光栅的带宽的大小, $\Delta\lambda$ 对应一个上限值, ΔL 对应一个最小值。此外, 由于光纤光栅 Sagnac 环的制作工艺要求较高, 当 $\Delta L \leq 0.50\text{mm}$ 时, 现实中不容易实现, 因此本文采用臂长差范围: $0.50\text{mm} \leq \Delta L \leq 8.28\text{mm}$ 。

图 4 为基于光纤光栅 Sagnac 环的可调谐光电振荡器原理图。可以看出, 宽带激光光源发出连续的光波, 经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后, 通过光纤隔离器和光纤偏振控制器, 从端口 1 进入光纤光栅 Sagnac 环。为实现光纤光栅 Sagnac 环的臂长差可调, 我们在光纤光栅 Sagnac 环中嵌入 OVDL。当 $\Delta L \neq 0$ 时, 端口 2 输出的是受到余弦调制的光纤光栅的透射谱(如图 2 所示)。宽带激光光源被光纤光栅 Sagnac 环均匀地切割, 成为波长间隔可调谐的多波长激光光源。电光调制器和色散光纤构成一个可调谐的 FIR 滤波器, 实现光电振荡器的模式选择。为了弥补光波在传输过程中损耗, 确保振荡器能够起振, 减少非线性效应, 在调制光载波信号经过色散光纤后再次被 EDFA 放大, 最后经高速光电探测器(PD)转化为微波电信号, 通过电放大器(EA)对产生的微波信号进行放大, 经电耦合器实现部分微波信号输出, 其余部分作为调制信号输入电光调制器, 构成振荡器正反馈回路。为了减少光波信号在振荡器回路中的损耗, 在振荡器回路中采用了 3 个偏振控制器控制光波的偏振状态。

光电振荡器是一个闭环正反馈系统, 利用环路反馈的递归关系, 经过循环叠加形成稳定振荡后在电光调制器输入端的微波信号可表示为^[7]:

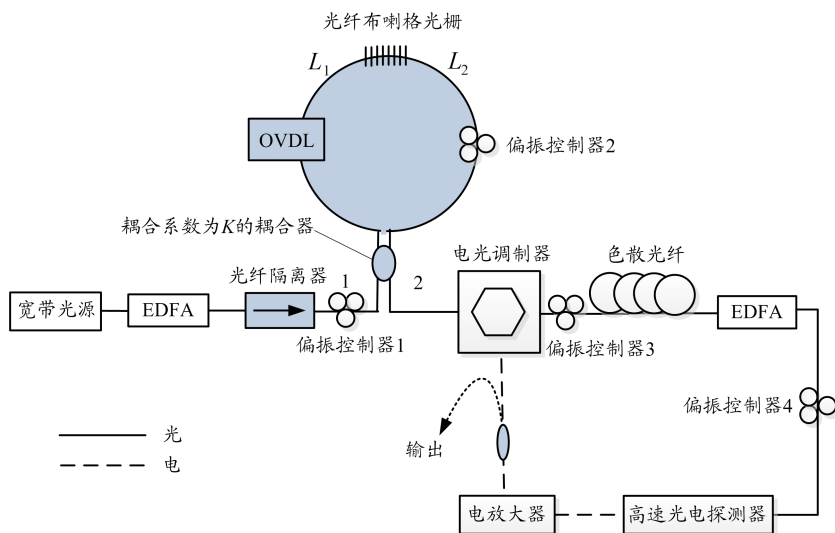


图 4 基于光纤光栅 Sagnac 环的可调谐光电振荡器原理图

$$V(w, t)_m = V_{in}(w, t) \sum_{m=0}^{\infty} [g(w)e^{jw\tau}]^m = \frac{V_{in}(w, t)}{1 - g(w)e^{jw\tau}} \quad (3)$$

其中, m 为整数, $V_{in}(w, t)$ 为输入调制器的初始微波信号, $g(w)$ 为系统的开环复增益, τ 为色散光纤单程产生的时间延时 ($\tau = \Delta\lambda \times \chi$), χ 为色散光纤单程产生的总色散, w 为振荡信号的角频率。在光纤振荡器中稳定振荡的微波信号, 需要满足以下相位条件:

$$w\tau = 2\pi f\Delta\lambda \times \chi = 2N\pi \quad (4)$$

由式(4)可得:

$$f^N = \frac{N}{\Delta\lambda\chi} = \frac{N\Delta L}{2n_{eff}\Lambda^2\chi} \quad (5)$$

其中, f 为光电振荡器闭环回路中能够稳定振荡的频率; N 为正整数, 表示振荡模式的阶数; f^N 表示第 N 阶振荡模式的频率^[8]。通过在光电振荡器回路中加入 EDFA 和 EA, 使光电振荡器中满足相位条件的振荡模式同时满足幅度条件, 形成正反馈回路, 产生稳定的微波信号输出。

2 仿真分析和讨论

根据式(5), 当 $N=1$ 时, 可得光电振荡器环路中第一阶振荡频率和光纤光栅 Sagnac 环臂长差 ΔL 的关系如图 5 所示。其中, $n_{eff}=1.452$, $\Lambda=534\text{nm}$, $\chi=609\text{ps/nm}$ 。光电振荡器环路中第一阶振荡频率和光纤光栅 Sagnac 环臂长差 ΔL 呈线性关系, 通过调整 OVDL 改变光纤光栅 Sagnac 环臂长差 ΔL , 可实现光电振荡器环路中第一阶振荡频率的改变。

光纤光栅 Sagnac 环臂长差不同时光电振荡器回路中的频率振荡模式如图 6 所示。从图 6(a)可以看出, 通过改变光纤光栅 Sagnac 环臂长差 ΔL , 光电振荡器环路中振荡模式的自由频谱范围(FSR)和第一阶振荡频率 f^1 也随之改变。 $FSR = \frac{1}{\Delta\lambda \times \chi} = f^1$, 当 $\Delta L=0.50\text{mm}$ 时, $FSR=f^1=0.9915\text{GHz}$; 当 $\Delta L=0.70\text{mm}$ 时, $FSR=f^1=1.3880\text{GHz}$ 。光纤光栅 Sagnac 环臂长差 ΔL 增大, 光电振荡器环路中振荡模式的 FSR 随之线性增大。为产生单一频率的微波信号, 可以通过改变光纤光栅 Sagnac 环臂长差 ΔL 来改变振荡模式 FSR。从图 6(b)可以看出, 当 $\Delta L=5.00\text{mm}$ 时, $FSR=f^1=9.9146\text{GHz}$, 在 19.8292GHz 频率范围内只有一个振荡模式; 当 $\Delta L=8.28\text{mm}$

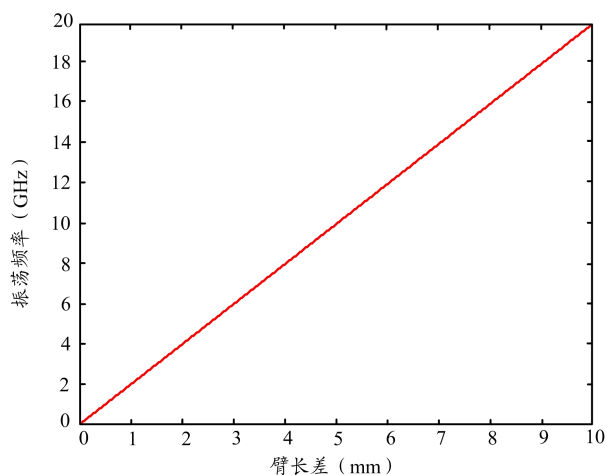
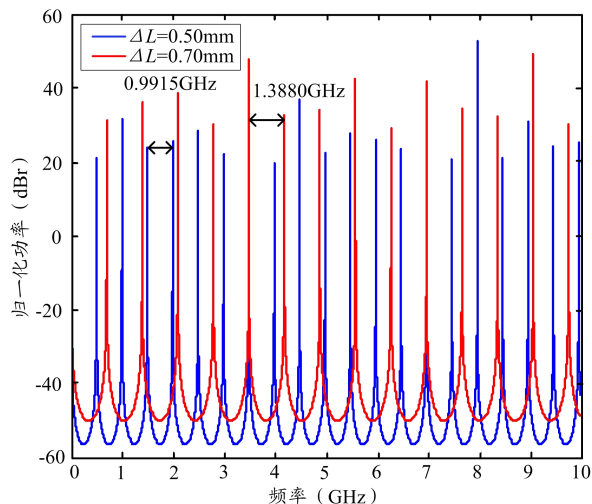
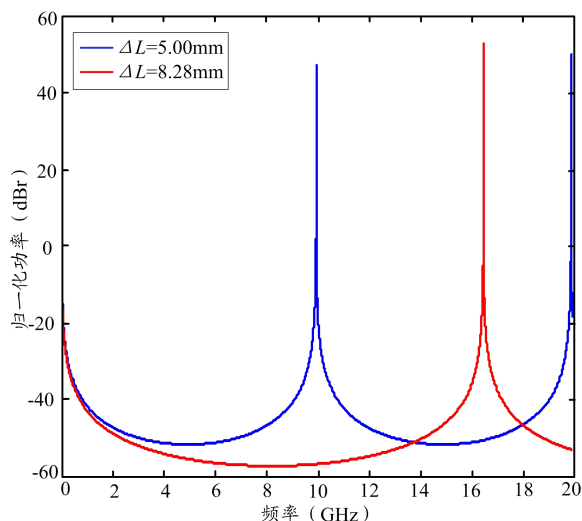


图5 光电振荡器环路中
第一阶振荡频率和光纤光栅 Sagnac 环臂长差关系



(a) 光纤光栅 Sagnac 环臂长差分别为 0.50mm、0.70mm



(b) 光纤光栅 Sagnac 环臂长差分别为 5.00mm、8.28mm

图6 不同光纤光栅 Sagnac 环
臂长差时光电振荡器环路中的频率振荡模式

时, $FSR=f^{-1}=16.4190\text{GHz}$, 在 32.8380GHz 频率范围内只有一个振荡模式。由于 PD 和 EA 具有特定的频率带宽, 通过为其选择合适带宽, 可以在系统中省去电带通滤波器。当 $0.50\text{mm} \leq \Delta L \leq 8.28\text{mm}$ 时, 该结构的光电振荡器能够实现 $0.9915 \sim 16.4190\text{GHz}$ 频率范围内单一频率的微波信号输出, 边模抑制比达到 20dB , 当 OVDL 的最小变化步长为 0.01mm 时, 输出频率的调谐步长为 19.8MHz 。

3 结束语

本文提出了一种基于光纤光栅 Sagnac 环的可调谐光电振荡器设计方案。利用光纤光栅 Sagnac 环切割宽带光源, 借助于 OVDL, 调整光纤光栅 Sagnac 环的臂长差, 产生波长间隔均匀且可调的多波长激光束, 电光调制器和长距离色散光纤构成可调谐 FIR 滤波器, 用于光电振荡器振荡模式的选择, 无需使用价格昂贵的电可调谐滤波器。当光纤光栅 Sagnac 环的臂长差在 $0.50 \sim 8.28\text{mm}$ 范围内变化, OVDL 的最小变化步长为 0.01mm 时, 能够实现 $0.9915 \sim 16.4190\text{GHz}$ 频率范围内的单一频率微波信号输出, 频率调谐步长为 19.8MHz , 边模抑制比达到 20dB 。

参考文献:

- [1] STÉPHANE P, JEAN-PIERRE G, WILLIAM T R, et al. Continuous Radio-frequency Tuning of an Optoelectronic Oscillator with Dispersive Feedback[J]. Optics Letters, 2002, 27(15): 1300–1302.
- [2] LIU Xinkai, PAN Wei, ZOU Xihua, et al. A reconfigurable optoelectronic oscillator based on cascaded coherence-controllable recirculating delay lines[J]. Optics Express, 2012, 20(12): 13296–13301.
- [3] JIANG Fan, WONG Jiahao, LAM H Q, et al. An Optically Tunable Wideband Optoelectronic Oscillator Based On a Bandpass Microwave Photonic Filter[J]. Optics Express, 2013, 21(14): 16381–16389.
- [4] LI Chengxin, WANG Ying, WANG Wei, et al. Widely Tunable Optoelectronic Oscillator Using a Dispersion-Induced Single Bandpass MPF[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(1): 7–10.
- [5] 钱景仁, 梁明. 光纤光栅 Sagnac 环特性及包络带通滤波器的研究[J]. 中国激光, 2005, 30(2): 159–162.
- [6] 刘宁, 刘颂豪, 廖常俊, 等. 含有光纤光栅的萨尼亚克环的透射特性分析[J]. 光学学报, 2001, 21(4): 476–479.
- [7] 胡总华, 聂奎营, 王旭. 基于光纤环级联结构的新型光电振荡器[J]. 光通信技术, 2017, 41(3): 30–32.
- [8] LI M, LI W Z, YAO J P, et al. Tunable Optoelectronic Oscillator Incorporating a High-Q Spectrum-Sliced Photonic Microwave Transversal Filter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(14): 1251–1253.