光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023071805

基于相位调制等效展宽激光线宽的极低相噪光电振荡器

庾财斌*，于 优，张 浩，肖永川，瞿鹏飞，李 波，孙力军，刘必晨
（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘 要： 光电振荡器是一种采用光电结合方式的新型微波频率源，其利用光学长时储能，可以实现极低相位噪声的信号输出。文章研究了光纤中散射噪声对光电振荡器相位噪声的影响，重点介绍了基于相位调制等效展宽激光线宽，抑制布里渊散射噪声架构，通过理论公式推导以及实验验证，表明了上述架构可极大改善光电振荡器的相位噪声。实验中采用调制频率为 50 MHz、调制幅度为 3.1 的相位调制信号对激光线宽进行等效展宽，得到在 10 GHz 频率下为－157.3 dBc/Hz@10 kHz 的极低相位噪声信号输出。

关键词： 相位调制；激光线宽；极低相噪；光电振荡器
中图分类号： TN911.74 **文章编号：** 1001－5868(2023)05－0662－04

Ultra-low Phase Noise Optoelectric Oscillator Based on Equivalent Broadening of Laser Line-width by Phase Modulation

YU Caibin, YU You, ZHANG Hao, XIAO Yongchuan, QU Pengfei, LI Bo, SUN Lijun, LIU Bichen
(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: Optoelectronic oscillator is a new type of microwave frequency source with optoelectronic combination. It can realize signal output with ultra-low phase noise by using optical long-term energy storage. In this paper, the influence of scattering noise in optical fiber on the phase noise of optoelectronic oscillator was studied. The structure of suppressing Brillouin scattering noise based on equivalent broadening of laser line-width by phase modulation was emphatically introduced. Through theoretical formula derivation and experimental verification, it is shown that the above structure can greatly improve the phase noise of optoelectronic oscillator. In the experiment, a phase modulation signal with a modulation frequency of 50 MHz and a modulation amplitude of 3.1 is used to broaden laser line-width, and an ultra-low phase noise signal of －157.3 dBc/Hz@10 kHz at a frequency of 10 GHz is obtained.

Key words: phase modulation; laser line-width; ultra-low phase noise; optoelectronic oscillator

0 引言

频率源作为基准参考信号和本振信号，是电子装备中的关键部件[1-4]。光电振荡器作为一种新型微波频率源，具有相噪小、功耗低和大带宽可调谐的优点，随着新一代电子装备性能的不断提升，对频率源的性能要求也越来越高，特别是对频率源的相位噪声指标，例如相位噪声直接影响雷达多普勒频率的检测灵敏度和动态范围，所以研制超低相位噪声的光电振荡器具有十分重要的意义。

在光电振荡器中相噪是衡量这个系统好坏的重要指标，降低相噪的方法也是光电振荡器中的研究

收稿日期：2023－07－18.
基金项目：重庆市博士后科学基金项目(CSTC2019jcyj-bshx0103).
* **通信作者：**庾财斌 **E-mail：** yucaibin.0926@163.com

热点[5-10]，目前主要有两种方式降低光电振荡器的输出信号相位噪声。一是使用低噪声的有源器件，环路中的噪声主要来源于激光器、光电探测器以及电放大器的噪声，选用低噪声的有源器件可以有效降低光电振荡器的输出相噪，但是在相噪水平较低的光电振荡器系统中（相噪小于 −150 dBc/Hz@10 kHz），该方法对相噪的改善效果有限。二是使用较长光纤储能[11]，通过增加光纤的长度（即延长环路的储能时间）来增加环路的 Q 值，使用 16 km 的光纤构成的光电振荡器系统中，系统理论相噪为 −160 dBc/Hz@10 kHz[7]。但是光纤长度的增加会导致光纤中的散射噪声增加，特别是当输入光功率大于光纤的布里渊阈值时，散射噪声的增加会急剧恶化光电振荡器的相位噪声。

本文采用相位调制的方法对光源发出的激光进行调制，在保证激光器输出光信号噪声及功率不变的情况下等效展宽输出光谱，降低了光信号在长光纤中传输时产生的散射噪声，极大地降低了 OEO 系统的相位噪声。实验结果显示，在采用相位调制技术后，OEO 的相噪降低了 7.1 dB，在 10 GHz 信号输出情况下相位噪声为 −157.3 dBc/Hz@10 kHz。

1　理论分析

假设由激光器输出的光载波电场强度为：

$$E = E_0 \exp(\mathrm{i}2\pi\nu_0 t) \tag{1}$$

式中，E_0 和 ν_0 分别为光载波电场的振幅和中心频率，光载波经过调制深度为 M，调制频率为 ν_x 的相位调制后，输出的电场强度可表示为：

$$E = E_0 \exp[\mathrm{i}2\pi\nu_0 t + \mathrm{i}M\sin(2\pi\nu_x t)] \tag{2}$$

在频域上，假设光载波经过频偏为 $\Delta\nu$、调制频率为 ν_x 的频率调制，则光载波的电场强度可表示为：

$$E = E_0 \exp\{\mathrm{i}2\pi[\nu_0 + \Delta\nu\cos(2\pi\nu_x\tau)]t\} \tag{3}$$

对上式频率调制项进行积分得：

$$E = E_0 \exp\{\mathrm{i}2\pi\nu_0 t + \mathrm{i}2\pi\Delta\nu[\int_0^\tau \cos(2\pi\nu_x\tau)\mathrm{d}\tau]t\} =$$

$$E_0 \exp\{\mathrm{i}2\pi\nu_0 t + \mathrm{i}(\Delta\nu/\nu_x)\sin(2\pi\nu_x t)\} \tag{4}$$

由于频率的积分等于相位，故公式(2)等于公式(4)，比较(2)，(4)可得：

$$M = \Delta\nu/\nu_x \tag{5}$$

受激布里渊散射阈值公式如下：

$$P_{\mathrm{th}} = 21\frac{KA_{\mathrm{eff}}}{g_{\mathrm{B}}L_{\mathrm{eff}}}\left(1+\frac{\Delta\nu_{\mathrm{s}}}{\Delta\nu_{\mathrm{B}}}\right) \tag{6}$$

式中，K 为偏振因子，g_{B} 为布里渊增益峰值，A_{eff} 和 L_{eff} 分别为光纤的有效面积和有效长度，$\Delta\nu_{\mathrm{s}}$ 为激光载波线宽，可近似认为 $\Delta\nu_{\mathrm{s}} = 2\Delta\nu$，$\Delta\nu_{\mathrm{B}}$ 为布里渊增益带宽，约为 50 MHz。由上式可以看出，在其他参数一定的情况下，激光线宽决定了光纤中的受激布里渊散射阈值，激光线宽越大，受激布里渊散射阈值越高。但是，激光器在其线宽大的情况下，其 RIN 噪声往往越大，会导致 OEO 相噪的恶化。把公式(5)代入公式(6)中可得：

$$P_{\mathrm{th}} = 21\frac{KA_{\mathrm{eff}}}{g_{\mathrm{B}}L_{\mathrm{eff}}}\left(1+\frac{2M\nu_x}{\Delta\nu_{\mathrm{B}}}\right) \tag{7}$$

由上式可以看出，在窄线宽低 RIN 噪声的激光输入情况下，通过相位调制等效展宽激光线宽，可以提高受激布里渊散射阈值，并且受激布里渊的散射阈值随调制深度和调制频率的增大而增大。

2　实验论证

为了验证相位调制等效展宽激光线宽对布里渊散射噪声的影响，我们搭建了如图 1 所示的实验装置。激光源为大功率半导体激光器，输出光功率为 20 dBm，线宽为 0.5 MHz，中心波长为 1 550.12 nm。相位调制器采用铌酸锂体材料调制器，半波电压为 4.5 V@1 GHz。加载的调制信号由微波信号源提供。激光器输出的光进入相位调制中，通过加载的微波信号进行相位调制产生多个调制边带，调制后的输出光通过光纤可调衰减器控制进入光纤中的光功率，长光纤使用 10 km 的 G652 光纤，后向散射光通过光环形器进入光功率计中进行光功率监测。

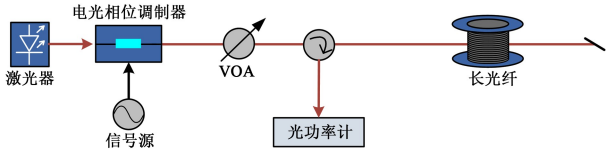

图 1　实验装置图

设置信号源的输出波形为正弦波，频率为 50 MHz，峰峰值电压为 9 V，通过可调光纤衰减器调整入纤光功率，测得的后向布里渊散射噪声光功率如下图 2 所示。从图中可以看到，当不进行相位调制时，布里渊散射噪声光功率在入纤光功率大于 9 dBm 时呈指数型增长，当进行相位调制时，布里渊散射噪声光功率随入纤光功率呈线性增长。实验结果说明相位调制可以有效提高光纤中布里渊散射阈值，减少布里渊散射噪声光功率。

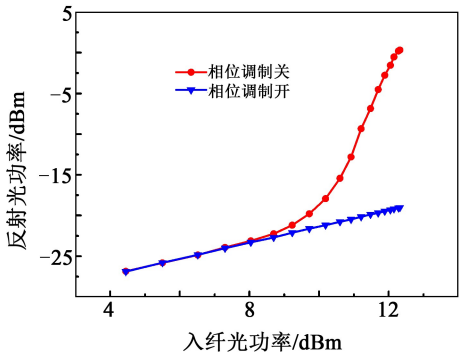

图 2 相位调制对布里渊散射噪声光功率的影响

为了探究调制电压对光纤中布里渊散射噪声光功率的影响，设置信号源的输出波形为正弦波，频率为 50 MHz，入纤光功率为 12.28 dBm，改变信号源输出正弦波的峰峰值电压，测得的后向布里渊散射噪声光功率如下图 3 所示。从图中可以看到，当调制信号的幅度在一定范围内增加时，布里渊散射噪声的光功率呈线性减少，当调制信号的峰峰幅值大于 8 V 时，布里渊散射噪声的光功率接近最小值。实验结果说明，当入纤光功率超过光纤布里渊散射阈值时，在一定范围内增加相位调制信号的幅值可以有效减少光纤中布里渊散射噪声光功率。

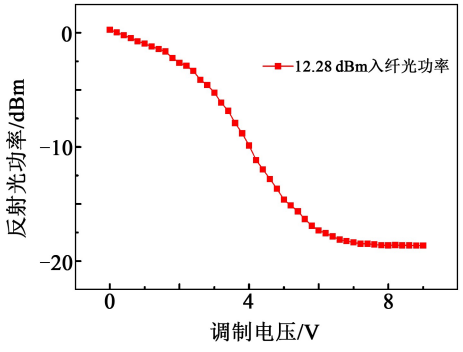

图 3 相位调制电压对布里渊散射噪声光功率的影响

为了探究调制频率对光纤中布里渊散射噪声光功率的影响，设置信号源的输出波形为正弦波，信号峰峰值为 9 V，入纤光功率为 12.28 dBm，改变信号源输出正弦波的频率，测得的后向布里渊散射噪声光功率如下图 4 所示。从图中可以看到，当调制信号的频率在一定范围内增加时，布里渊散射噪声的光功率呈线性减少，当调制信号的频率大于 40 MHz 时，布里渊散射噪声的光功率接近最小值。实验结果说明，当入纤光功率超过光纤布里渊散射阈值时，在一定范围内增加相位调制信号的频率可以有效减少光纤中布里渊散射噪声光功率。

通过上述实验表明，在输入光信号上加载一定幅值和频率的相位调制，可以有效减少光纤中的布里渊后向散射噪声功率。利用该原理，我们在光电振荡器中加入相位调制功能，测得光电振荡器的输出 10 GHz 信号相位噪声为 −157.3 dBc/Hz@10 kHz，如下图 5 所示，与没有加入相位调制功能的光电振荡器相比，相位噪声降低了 7.1 dB。

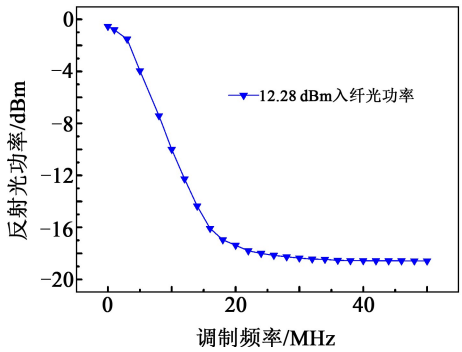

图 4 相位调制频率对布里渊散射噪声光功率的影响

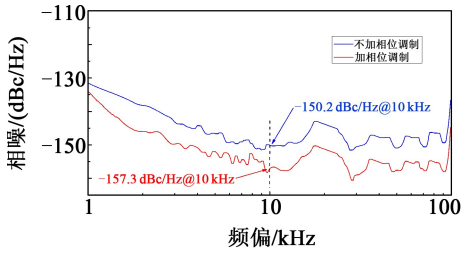

图 5 光电振荡器相噪测试结果

3 结论

本文研究了相位调制光信号在光纤中传输时的布里渊散射情况，理论分析并实验验证了光纤中后向布里渊散射信号强度随相位调制幅度以及频率的关系。研究表明，经过相位调制的光信号在长光纤中传输时，其布里渊散射噪声信号可以大幅减少。我们在光电振荡器中引入该原理，利用相位调制的光源信号减少长光纤中的布里渊散射噪声，得到了光电振荡器在 10 GHz 频率下为−157.3 dBc/Hz@10 kHz 的极低相位噪声信号输出。

参考文献：

[1] Maleki L. The optoelectronic oscillator[J]. Nature Photonics, 2011, 5(12): 728-730.

[2] 杨 博，梁允峰，孟联文，等. 频率源对雷达测速精度影响分析[J]. 宇航学报，2018，39(3)：319-325.
Yang Bo, Liang Yunfeng, Meng Lianwen, et al. Analysis of the effects of frequency source on the velocity measuring precision of radar[J]. J. of Astronautics, 2018, 39(3): 319-325.

[3] 杨 俊，许 强. 频率源的相位噪声对雷达系统性能的影响

[J]. 舰船电子对抗，2016，39(1)：58-61.
Yang Jun，Xu Qiang. Influence of phase noise of frequency source on radar system performance[J]. Shipboard Electronic Countermeasure，2016，39(1)：58-61.

[4] 王新浪，蔡　杰，季　帅，等. 频率源相位噪声对雷达改善因子的影响[J]. 现代导航，2020，5(11)：367-371.
Wang Xinlang，Cai Jie，Ji Shuai，et al. Influence of phase noise of frequency source on radar improvement factor[J]. Modern Navigation，2020，5(11)：367-371.

[5] 石英亮，张　羽，孙力军. 激光器对光电振荡器相位噪声的影响[J]. 激光技术，2015，39(6)：762-764.
Shi Yingliang，Zhang Yu，Sun Lijun. Influence of lasers on phase noise of optoelectronic oscillators[J]. Laser Technology，2015，39(6)：762-764.

[6] 张　羽，高　阳，孙力军. 加性噪声对微波光电振荡器相位噪声的影响[J]. 半导体光电，2014，34(3)：490-493.
Zhang Yu，Gao Yang，Sun Lijun. Influences of additive noise on phase noise of microwave optoelectronic oscillators[J]. Semiconductor Optoelectronics，2014，34(3)：490-493.

[7] Eliyahu D，Seidel D，Maleki L. RF amplitude and phase-noise reduction of an optical link and an opto-electronic oscillator [J]. IEEE Trans. on Microwave Theory & Techniques，2008，56(2)：449-456.

[8] 滕义超，张宝富，李得龙，等. 降低光电振荡器相位噪声的方法研究[J]. 半导体光电，2014，35(2)：171-175.
Teng Yichao，Zhang Baofu，Li Delong，et al. Research on phase noise reduction of optoelectronic oscillators [J]. Semiconductor Optoelectronics，2014，35(2)：171-175.

[9] Eliyahu D，Sariri K，Taylor J，et al. Optoelectronic oscillator with improved phase noise and frequency stability[C]// Inter. Society for Optics and Photonics，Integrated Optoelectronics Devices，2003：139-147.

[10] Shieh W，Yao X S，Maleki L，et al. Phase-niose characterization of optoelectronic components by carrier suppression techniques[C]// Optical Fiber Communication Conf. and Exhibit，1998：263-264.

[11] 陈吉欣，惠　洋，鄢　勃，等. 长光纤环高性能光电振荡器研究[J]. 光学学报，2013，33(1)：95-99.
Chen Jixin，Hui Yang，Yan Bo，et al. Research on long fiber loop optoelectronic oscillator of high performance[J]. Acta Optica Sinica，2013，33(1)：95-99.

作者简介：

庾财斌(1990—)，男，广西省桂林市人，博士，主要研究方向为微波光子技术、光电振荡器技术。