

基于相位调制光谱展宽的低相噪光电振荡器

崇毓华^{1,2}, 梅理^{1,2}, 戴泽璟^{1,2}, 王润^{1,2}, 张业斌^{1,2}, 王凯^{1,2}

¹中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽 合肥

²安徽省天线与微波工程实验室, 安徽 合肥

收稿日期: 2024年8月19日; 录用日期: 2024年9月13日; 发布日期: 2024年9月23日

摘要

本文提出一种采用相位调制的光电振荡器(Opto-Electronic Oscillator, OEO), 通过微波双工器耦合一路微波辅助调制信号, 和OEO的振荡信号一起注入到相位调制器中, 提高辅助调制信号的功率可展宽光谱并大幅降低光载波功率, 从而降低因光纤非线性导致的光链路散射噪声, 实现OEO低相噪输出。搭建了实验测试系统, 辅助调制信号采用1.4 GHz~1.9 GHz的线性调频信号, 调制系数为2.4, 与不加辅助调制相比, OEO输出信号在10 kHz频偏处的相位噪声优化了32.4 dB。

关键词

光电振荡器, 相位调制, 低相位噪声

Low Phase Noise Opto-Electronic Oscillator Based on Spectra Broadening by Phase Modulation

Yuhua Chong^{1,2}, Li Mei^{1,2}, Zejing Dai^{1,2}, Run Wang^{1,2}, Yebin Zhang^{1,2}, Kai Wang^{1,2}

¹The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei Anhui

²Anhui Province Engineering Laboratory for Antennas and Microwave, Hefei Anhui

Received: Aug. 19th, 2024; accepted: Sep. 13th, 2024; published: Sep. 23rd, 2024

Abstract

In this paper, a phase-modulated opto-electronic oscillator (OEO) is proposed, which uses phase modulation for spectra broadening to suppress the fiber optical link noise caused by long fiber transmission. A microwave-assisted modulation signal can be coupled by a microwave diplexer and

injected into the phase modulator together with the oscillating signal of the OEO. The spectra can be greatly broadened by the strong assisted modulation signal, thus reducing the scattering noise caused by the nonlinearity of the optical fiber. Experimental tests were conducted, a linear frequency modulation signal ranging from 1.4 GHz to 1.9 GHz with a modulation coefficient of approximately 2.4 was used as the assisted modulation signal. Compared with no assisted modulation, the phase noise of the oscillating signal at a frequency offset of 10 kHz was optimized by 32.4 dB.

Keywords

Opto-Electronic Oscillator (OEO), Phase Modulation, Low Phase Noise

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高性能的振荡器是雷达、电子战、通讯和现代仪器设备的核心器件，不仅为雷达系统提供高频谱纯度本振，还为电子战系统中高速 A/D 和 D/A 提供低抖动时钟。雷达系统为了获得良好的相参处理增益及对杂波的抑制能力，要求本振源具有低相位噪声和高频率稳定度[1][2]。传统微波频率合成技术采用低频恒温晶振作为参考基准，通过倍频方式产生高频信号，但在倍频过程中相位噪声按 $20\log N$ (N 为倍频因子) 恶化，使得高频信号的相位噪声难以提升。

光电振荡器(Opto-Electronic Oscillator, OEO)一般采用长光纤构成光电振荡环腔，由于光纤的低损耗特性，光纤越长品质因子(Q 值)越高，且 Q 值不随着信号的频率增加而降低，因此其特别适合产生高频、低相位噪声的微波信号[3][4]。但是长光纤引入了瑞利散射、布里渊散射等噪声[5]，极大地恶化了 OEO 输出信号的相位噪声。庾财斌[6]等人提出采用相位调制等效展宽激光线宽的方法来抑制布里渊散射噪声，与没有加入相位调制的 OEO 相比，在 10 kHz 频偏处的相位噪声降低了 7.1 dB。刘世锋[7]等人提出一种基于级联相位调制器的注入锁定 OEO，用相位调制实现调制器输出光谱展宽并保持在光纤中传播功率恒定，降低了光纤非线性效应引入的强度噪声，并采用马赫曾德尔干涉器(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)实现相位调制到强度调制的转化。

本文提出一种基于相位调制和光纤光栅的低相噪 OEO。通过光纤光栅滤除部分相位调制边带，实现相位调制到强度调制的转换，省去了强度调制器的偏压控制电路，且相位调制器的光插损也更小。并通过微波双工器将辅助调制信号与振荡信号合为一路加载到电光相位调制器上，该方案结构紧凑，避免增加相位调制器带来额外插损和体积、成本的增加。下文首先分析了基于相位调制器的低相噪 OEO 系统结构，然后讨论了采用微波辅助调制光谱展宽实现噪声抑制的原理，最后搭建了 OEO 实验系统，测试不加辅助调制、加点频率调制和加线性调频调制情况下的相位噪声结果，并进行了对比分析。

2. 基于相位调制光谱展宽的 OEO

图 1 所示为基于相位调制光谱展宽的 OEO 结构示意图，主要由光源，相位调制器，光纤，环形器，光纤光栅，光探测器，放大器，带通滤波器，耦合器，微波源以及双工器等组成。激光器发出的连续波光信号，通过相位调制器将输入微波信号调制到光载波上，经长光纤、光环形器、光纤光栅和光探测器又恢复出微波信号，然后经过微波放大器、带通滤波器、耦合器、微波放大器和双工器再加载到相位调制器上，构成光电振荡环路。其中光纤光栅的作用是滤除部分相位调制边带，实现相位调制到强度调制的

转换。此外，通过微波双工器可耦合一路不同频段的辅助微波调制信号，和 OEO 的振荡信号一起注入到相位调制器中。

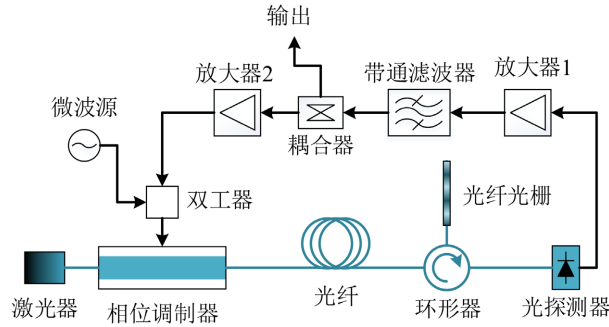


Figure 1. Diagram of OEO structure based on phase modulator
图 1. 基于相位调制器的 OEO 结构图

为了提高光电振荡信号的信噪比以优化振荡信号的相位噪声，需要提高光源输出功率。但是随着进入到光纤中的光功率增大，容易激发光纤中的各类非线性效应，比如受激布里渊散射、自相位调制及四波混频等[8][9]。本文通过增加大功率辅助调制信号可大幅展宽相位调制器的输出光谱，将光载波的能量分散到各个调制边带上，从而降低光链路的散射噪声。辅助调制信号与 OEO 振荡信号频率不同，会被带通滤波器滤除，因此 OEO 的输出不存在辅助调制信号引起的频率杂散。

设激光器输出的光场为：

$$E_{laser} = E_0 \cdot e^{j\omega_0 t} \tag{1}$$

其中， E_0 为光场振幅， ω_0 为光场中心波长所对应的角频率。

经相位调制之后的光场为：

$$E_{PM} = E_{laser} \cdot e^{j\pi/V_\pi \cdot v_{rf}(t)} = E_0 \cdot e^{j\omega_0 t + j\pi/V_\pi \cdot v_{rf}(t)} \tag{2}$$

上式中， V_π 为相位调制器的半波电压， $v_{rf}(t)$ 为加载的微波调制信号。如果将相位调制之后的光场直接送入探测器进行光电转换，则光探测器的输出只有直流信号，不包含加载的微波调制信息。

设调制的微波信号为 $v_{rf}(t) = V_{rf}(\omega_{rf}t)$ ，则相位调制后的光场展开为一系列频率分量：

$$E_{PM} = E_0 e^{j\omega_0 t} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n \left(\frac{\pi}{V_\pi} V_{rf} \right) e^{jn\omega_{rf}t} \tag{3}$$

式中， $J_n(\cdot)$ 为 n 阶贝塞尔函数。

通过光纤光栅滤除其中的部分频率分量，例如负 1 阶频率边带透射出，其余包括载波和正 1 阶频率边带均被光纤光栅反射：

$$E_{PM-filter} = E_0 e^{j\omega_0 t} \left[J_0 \left(\frac{\pi}{V_\pi} V_{rf} \right) + J_1 \left(\frac{\pi}{V_\pi} V_{rf} \right) e^{j\omega_{rf}t} \right] \tag{4}$$

在小信号调制下，可近似为：

$$E_{PM-filter} = E_0 e^{j\omega_0 t} \left(1 + \frac{\pi}{2V_\pi} V_{rf} e^{j\omega_{rf}t} \right) \tag{5}$$

将其输入到探测器中进行光电转换，结果如下：

$$i_{PD} = \eta E_{PM-filter} \cdot E_{PM-filter}^* = \eta E_0^2 \left[1 + \left(\frac{\pi}{2V_\pi} V_{rf} \right)^2 + \frac{\pi}{V_\pi} V_{rf} \cos(\omega_{rf} t) \right] \quad (6)$$

由(6)可看出, 通过光纤光栅滤波器实现了相位调制强度转换, 在探测器上可解调出微波信号。

根据式(3), 相位调制后的光源光谱由窄线宽光源调制成包含多个边带的宽谱光信号, 当调制信号功率足够大时, 调制边带的强度甚至会高于载波信号强度。在小信号近似下, $J_0(\pi/V_\pi \cdot V_{rf}) \approx 1$; 而随着调制信号变强时, $J_0(\pi/V_\pi \cdot V_{rf})$ 会逐渐减小; 当取某特定强度的信号进行调制时 $J_0(\pi/V_\pi \cdot V_{rf})$ 可趋近于 0, 实现理想的载波抑制调制。 $\pi V_{rf}/V_\pi$ 表示为调制系数, 当调制系数分别取 0.3 和 2.4 时, 相位调制器的输出光谱(光载波频率为 193.4 THz)如图 2 所示。可见当调制系数取 2.4 时, 光载波信号可被抑制 40 dB 以上, 光场的绝大部分能量都分布在各阶边带上。

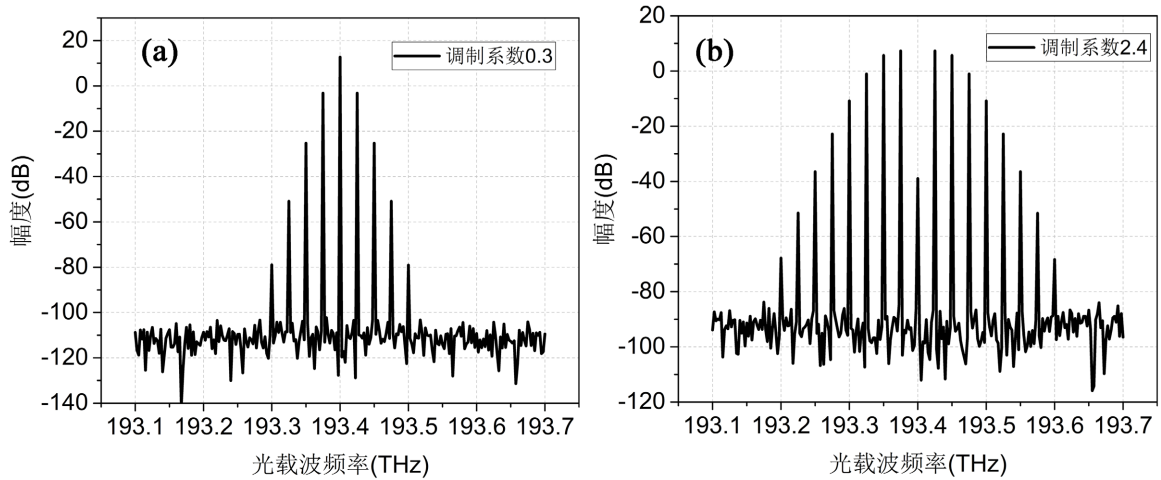


Figure 2. The output spectra of the phase modulator. (a) Modulation coefficient is 0.3; (b) Modulation coefficient is 2.4
图 2. 相位调制器输出光谱。(a) 调制系数为 0.3; (b) 调制系数为 2.4

相位调制抑制散射噪声的原理是通过展宽光谱来降低光谱密度, 从而提高散射噪声阈值。进一步可采用线性调频信号进行辅助调制, 由于调制频率时变, 使得调制光脉冲中不同位置处的光谱频率各不相同, 从而散射噪声无法有效的相干累积, 因而可进一步降低光传输链路的相位噪声。

3. 实验测试

我们搭建了如图 1 所示的实验装置。光源采用半导体激光器, 输出光功率为 20 dBm, 线宽为 0.5 MHz, 中心波长为 1550.12 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@10 GHz。加载的调制信号由任意波形发生器提供。微波带通滤波器中心频率为 10 GHz, 3 dB 带宽约为 15 MHz。光纤为 5 km 的色散位移光纤。单个微波放大器增益约为 20 dB, 工作频率为 10 GHz。

设置任意波形发生器的输出波形为三种情况: (1) 不输出, 即 OEO 不加相位调制; (2) 正弦波 1.5 GHz; (3) 中心频率为 1.65 GHz 的线性调频信号, 带宽为 500 MHz。任意波形发生器输出的信号均通过微波放大器放大, 输出功率为 25 dBm, 计算得到调制系数为 2.4。在光探测器前耦合输出一部分光信号进行测试, 光谱如图 3 所示。如图 4 所示为 OEO 输出的 10 GHz 信号的相位噪声测试结果。在无辅助调制时, OEO 输出信号的相噪为 -93.7 dBc/Hz@1 kHz 和 -116.7 dBc/Hz@10 kHz; 对于 1.5 GHz 点频率(正弦波)调制情况, 输出信号相噪为 -110.1 dBc/Hz@1 kHz 和 -136.0 dBc/Hz@10 kHz; 对于线性调频情况, OEO 输出相噪为 -119.7 dBc/Hz@1 kHz 和 -149.1 dBc/Hz@10 kHz, 与不加辅助调制相比, 相

位噪声分别优化了 19.3 dB@1 kHz 和 32.4 dB@10 kHz, 说明加辅助调制对相位噪声抑制效果显著。

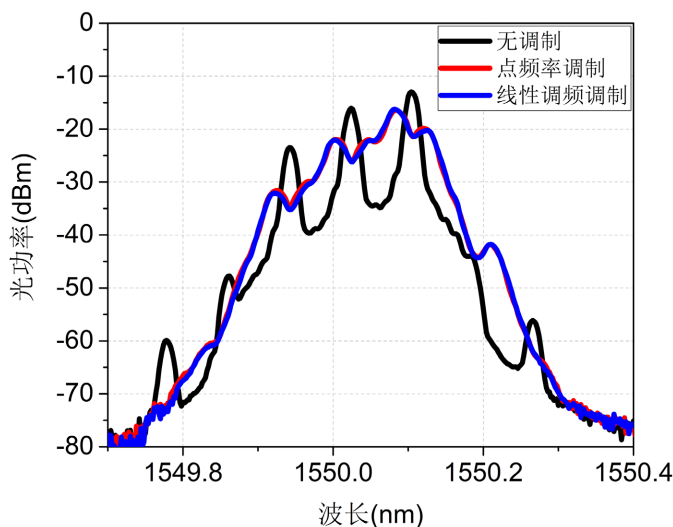


Figure 3. The output spectra of the fiber grating
图 3. 光栅输出的光谱图

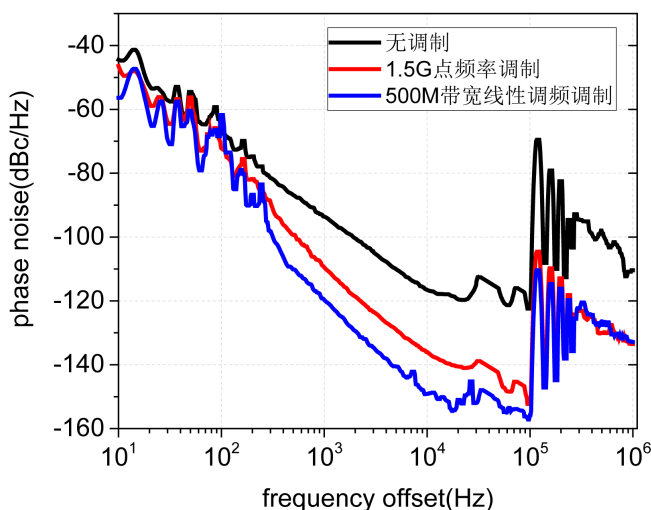


Figure 4. The phase noise test results of the OEO output@10 GHz
图 4. OEO 输出 10 GHz 信号的相位噪声测试结果

另外, OEO 还存在固有杂散频率, 其基频为环路延时的倒数, 根据图 4 还发现, 通过辅助微波调制对该 OEO 基频杂散也有一定抑制作用。可以理解为: 辅助调制将杂散和噪声能量吸收到辅助调制信号边带上, 从而降低了 OEO 的杂散和近端噪声。结合双光纤环可以获得大于 70 dBc 的杂散抑制, 从而可满足雷达系统的使用要求。另外我们在 OEO 的输出频谱中也观测不到辅助调制信号, 这是因为辅助调制信号被带通腔体滤波器滤除了。

4. 结论

本文介绍了一种采用相位调制光谱展宽的低相噪 OEO 方案, 通过微波双工器将辅助调制信号和振荡信号共同加载到相位调制器上, 并通过光栅滤波器实现相位调制到强度调制的转化, 避免了增加额外的

相位调制器。实验测试对比了三种不同辅助调制情况,分别为无辅助信号、1.5 GHz 正弦波和 1.4 GHz~1.9 GHz 的线性调频信号, OEO 输出的 10 GHz 信号相位噪声分别为-116.7 dBc/Hz@10 kHz(无调制), -136.0 dBc/Hz@10 kHz(正弦波)和-149.1 dBc/Hz@10 kHz(线性调频)。实验结果表明,通过相位调制展宽光谱可显著地降低 OEO 的相位噪声;当采用线性调频辅助调制时,由于频率时变,使得调制光脉冲中不同位置处的光谱频率各不相同,从而散射噪声无法有效地相干累积,可进一步降低光传输链路的散射噪声,与不加调制信号相比, OEO 输出信号的相位噪声指标优化了 32.4 dB@10 kHz。

基金项目

国家重点研发计划(2019YFB2203200)资助。

参考文献

- [1] 王新浪, 蔡杰, 季帅, 封艳民. 频率源相位噪声对雷达改善因子的影响[J]. 现代导航, 2020, 10(5): 367-371.
- [2] 蒋平虎, 张琳. 雷达改善因子与相位噪声及阿伦方差之间的关系[J]. 宇航计测技术, 2003, 23(1): 51-57.
- [3] Yao, X.S. and Maleki, L. (1996) Optoelectronic Microwave Oscillator. *Journal of the Optical Society of America B (Optical Physics)*, **13**, 1725-1735. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.13.001725>
- [4] Wang, X.C., et al. (2021) Ultra-Low Phase Noise Measurement of Microwave Sources Using Carrier Suppression Enabled by a Photonic Delay Line. *Journal of Lightwave Technology: A Joint IEEE/OSA Publication*, **39**, 7028-7039. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3110800>
- [5] 常乐, 董毅, 孙东宁, 等. 光纤稳相微波频率传输中相干瑞利噪声的影响与抑制[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 51-56.
- [6] 庾财斌, 于优, 张浩, 等. 基于相位调制等效展宽激光线宽的极低相噪光电振荡器[J]. 半导体光电, 2023, 44(5): 662-665.
- [7] 刘世锋, 徐晓瑞, 张方正, 等. 超低相噪光电振荡器及其频率综合技术研究[J]. 雷达学报, 2019, 8(2): 243-250.
- [8] Liu, Y., Lv, Z., Dong, Y., et al. (2009) Research on Stimulated Brillouin Scattering Suppression Based on Multi-Frequency Phase Modulation. *Chinese Optics Letters*, **1**, 29-31. <https://doi.org/10.3788/COL20090701.0029>
- [9] Eliyahu, D., Seidel, D. and Maleki, L. (2008) RF Amplitude and Phase-Noise Reduction of an Optical Link and an Optoelectronic Oscillator. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **56**, 449-456. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2007.914640>