

高斯白噪声相位调制的激光光谱展宽

闫景涛¹, 缪立军^{1*}, 毛建峰², 石锦¹, 黄腾超¹, 车双良¹, 舒晓武¹

1. 浙江大学光电科学与工程学院现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

2. 江西省交通高级技工学校, 江西 南昌 330105

摘要 激光器是现代光学中一种常用的光源, 分析其谱宽特性对于激光的研究具有重要意义。由于高性能窄线宽激光的半高全宽通常在几十 MHz 以内, 难以直接满足宽光谱领域的应用需求, 因而无法发挥其在成本和性能方面的优势, 这在一定程度上限制了激光的发展。如果在激光内部直接进行调制实现线宽展宽, 又会导致频率的严重漂移, 破坏稳频特性。为了在激光器波长稳定性不变的前提下得到宽光谱, 提出了一种以高斯白噪声为驱动电信号的外部相位调制方法。以激光相位噪声和光谱特征之间的关系为基础, 通过理论计算阐明了相位噪声对于光谱的展宽效应, 并基于 OptiSystem 光仿真软件和数值仿真分析了在不同白噪声参数下的光谱演变过程, 明确了要得到好的展宽和载波抑制效果需要高功率、大带宽的噪声信号源。搭建的外部相位调制系统采用 10 GHz 带宽的信号源, 通过两个前置预放大器以及一个高饱和输出功率放大器将噪声信号由 -17 dBm 最高提升至 28 dBm, 以此驱动半波电压 3.7 V 的铌酸锂电光相位调制器, 并在放大链路中加入低通滤波器和可调衰减器调节信号参数。研究对象为初始线宽 20 kHz 的分布式反馈半导体激光器, 通过光谱分析仪观测和对比调制前后的激光光谱, 得到了与理论及仿真相吻合的结果, 并拟合计算出展宽分量最高可达 65 GHz, 且载波也得以明显地抑制; 此外, 基于扫描式法布里-珀罗共焦腔评估了激光频率的漂移情况, 证明外部调制并未对激光的波长稳定性造成影响, 综合论证了高斯白噪声的相位调制方案能够实现优越的光谱展宽效果。由于调制后的光谱无边带和次峰, 且能实现数倍于调制带宽的展宽, 因此相较于正弦函数和伪随机编码等其他信号而言, 高斯白噪声具有明显的优势。该调制方法不依赖于激光器的本征线宽, 具有广泛的应用前景, 为相位调制和光谱展宽的相关研究提供了参考依据。

关键词 激光器线宽; 相位调制; 光谱展宽; 高斯白噪声

中图分类号: O433

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)03-0665-07

引言

激光器具有高亮度、高相干性和高方向性等特点, 在工业制造、航空航天、生物医疗等领域应用广泛。近年来随着在材料与工艺等方面突破性进步, 以半导体为工作物质的半导体激光器取得了一系列显著发展, 凭借其体积小、效率高、寿命长、结构简单、成本可控、中心波长稳定等优点, 被广泛应用于光通信及传感等众多领域^[1-2]。光谱是描述激光特性的重要手段, 谱宽是其中一项重要的参数, 它能够全面地表征出激光在不同波长的功率分布情况。目前常用的半导体激光器线宽一般为几十 MHz 到几 kHz 不等, 最窄可以达

到百 Hz 以内, 具有良好的单色性。然而, 并非所有的应用场景都需要窄线宽激光器, 例如在干涉式光纤陀螺中, 为了抑制背向散射和偏振耦合等引起的噪声和漂移, 需要光源线宽为 GHz 甚至 THz 量级^[3-4], 研究人员通常采用超辐射发光二极管或掺铒超荧光光纤光源等宽带光源而不是具备更优波长稳定性的激光器。此外, 对于窄线宽光纤激光而言, 为抑制受激布里渊散射非线性效应以进一步提升其输出功率, 需要展宽种子激光线宽降低布里渊散射增益峰^[5-6]。因此, 如何有效展宽激光光谱从而满足特定场景下的需求成为近年来的研究热点。由于直接调制激光会因频率与输出功率的耦合导致频率产生波动并劣化波长稳定性, 而外部相位调制可以做到不影响输出激光的光束质量, 是目前主要采用的一种

收稿日期: 2021-01-27, 修订日期: 2021-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(61203190), 航空科学基金项目(ASFC-2018ZC76005), 浙江省自然科学基金项目(LY17F030010, LQ18F050001)资助

作者简介: 闫景涛, 1996 年生, 浙江大学光电科学与工程学院现代光学仪器国家重点实验室博士研究生 e-mail: 12030002@zju.edu.cn

* 通讯作者 e-mail: mlj000000@zju.edu.cn

方案。它通过将射频电压信号加载到电光相位调制器上改变信号光的相位特性,从而达到光谱展宽的目的。国内外先后报道了通过正弦信号、伪随机编码信号以及高斯白噪声信号驱动铌酸锂电光相位调制器的方案^[7-9],并在各自相应的研究领域中取得了良好的效果,证明该项技术具有广阔的应用前景。现有研究表明,正弦信号和伪随机编码信号展宽效率低,并且调制光谱中会产生一系列的边带或次峰,尤其不利于在传感领域的应用;而利用高斯白噪声信号时展宽分量可达数倍于其自身带宽,且光谱中只包含单个载波,调制效果也不依赖于激光本征线宽^[10]。然而,国内外针对这一方法的理论研究十分匮乏,实验研究也并不完善。

提出了一种基于相位调制技术的激光光谱展宽方法,由电光相位调制器将高功率的宽带高斯白噪声电信号引入到光场的相位中破坏激光的单色性,实现光谱展宽。通过理论推导计算出相位噪声和激光光谱的关系,结合 OptiSystem 软件和数值仿真研究光谱在不同调制下的演变过程,得到了展宽线宽与载波抑制的表达式,最后搭建出实验系统获得了展宽后的激光光谱,并且验证了调制前后的波长稳定性保持不变。实验结果与理论分析和仿真一致。

1 理论分析

1.1 激光光谱与相位噪声特性

根据激光的半经典理论,激光器的单模输出光场被定义为一个随强度和相位波动而不再具有严格单色性的光场

$$E(t) = [E_0 + a(t)] \exp[i(2\pi\nu_0 t + \varphi(t))] \quad (1)$$

式(1)中, E_0 表示光场的恒定振幅, $a(t)$ 和 $\varphi(t)$ 分别表示光场振幅和相位的随机浮动, ν_0 为中心频率, t 为时间。因为通常情况下振幅浮动对光谱的影响可以忽略不计,此处仅考虑 $\varphi(t)$ 。根据维纳—辛钦定理,激光的光谱 $S_E(f)$ 可对光场的自相关函数作傅里叶变换得到,即

$$S_E(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_E(\tau) \exp(-i2\pi f\tau) d\tau \quad (2)$$

式(2)中, τ 为相位的随机起伏时间间隔, $R_E(\tau)$ 为光场的自相关函数,其表达式为

$$R_E(\tau) = \langle E(t)E^*(t-\tau) \rangle = E_0^2 \langle \exp[i\Delta\varphi(t, \tau)] \rangle \exp(i2\pi\nu_0\tau) \quad (3)$$

式(3)中, $\langle \rangle$ 表示整体均值, $\Delta\varphi(t, \tau)$ 为 τ 时刻间隔下的随机相位改变,由于在计算中可将其视为均值为 0 的平稳高斯随机涨落过程,因此

$$\langle \exp[\pm i\Delta\varphi(t, \tau)] \rangle = \exp\left[-\frac{1}{2}\langle \Delta\varphi^2(\tau) \rangle\right] \quad (4)$$

式(4)中, $\langle \Delta\varphi^2(\tau) \rangle = \int_0^\infty S_{\Delta\varphi}(f) df$, $S_{\Delta\varphi}(f)$ 为差分相位波动的功率谱密度函数。引入瞬时频率波动的功率谱密度函数(频率噪声) $S_F(f)$ 与瞬时相位波动的功率谱密度函数(相位噪声) $S_\varphi(f)$ 的概念,根据傅里叶变换中的相移定理和欧拉公式可求得三者的关系为

$$S_F(f) = f^2 S_\varphi(f) = \frac{f^2}{4\sin^2(\pi f\tau)} S_{\Delta\varphi}(f) \quad (5)$$

因此

$$\langle \Delta\varphi^2(\tau) \rangle = 4 \int_0^\infty S_F(f) \sin^2(\pi f\tau) / f^2 df \quad (6)$$

故在给定的 $S_F(f)$ 下, $R_E(\tau)$ 可以表示为^[11]

$$R_E(\tau) = E_0^2 \exp(i2\pi\nu_0\tau) \cdot \exp\left[-2 \int_0^\infty S_F(f) \sin^2(\pi f\tau) / f^2 df\right] \quad (7)$$

将式(7)代入式(2)可知,此时光谱不再表现出单色性,并且其线宽由 $S_F(f)$ 决定。故通过加入相位噪声可以达到光谱展宽的目的。

此外,由于外部相位调制过程发生在激光产生之后,因此不会对激光的中心频率产生扰动。在激光通过一个无损的相位调制器后,光场为^[9]

$$E(t) = E_0 \exp[i(2\pi\nu_0 t + \varphi(t) + \varphi_{pm}(t))] \quad (8)$$

式(8)中, $\varphi_{pm}(t)$ 为所施加的相位调制。此时光谱 $S(\nu)$ 可表示为本征激光光谱与调制所引起的光场涨落功率谱之间的卷积

$$S(\nu) = S_E(\nu) * S_{pm}(\nu) \quad (9)$$

由式(9)可知,调制不仅能使光谱展宽,还能够保持激光出色的频率稳定性。

1.2 高斯白噪声相位调制理论

不同功率谱的相频噪声对激光光谱会产生不一样的影响。研究表明,当其单点功率相比于所在频率较小时会因调制速度过快而只能影响到光谱的低功率边翼部分。Domenico 等报道了一种计算激光线宽的 β 分割线理论^[12-13],主要通过将激光的频率噪声全部近似为白噪声后,求出截止频率趋于 0 和无穷大时相应的激光线型,联立得到能够影响光谱半高全宽部分的噪声功率边界条件,最后对该有效噪声面积进行积分即可求出线宽。作为一种针对窄线宽激光本征光谱的拟合计算方法, β 算法不可避免的存在误差,并且很难适用于属于高斯白噪声的相位噪声。但是由 β 分割线的原理可知,只有提高噪声信号的功率和带宽才能够得到好的光谱展宽效果,因此实验采用宽带噪声的同时,还需要一阶甚至多阶放大器对信号功率进行放大。

实际的电子器件无法产生完美的白噪声信号,并且放大电路往往处于一定程度的饱和状态,信号的时域统计不会严格服从高斯分布;而铌酸锂电光相位调制器的半波电压在不同工作频率下也存在着线性变化,因此计算和仿真时仅考虑理想情况。假设高斯白噪声最高截止频率为 f_c , 功率谱密度为 $S_V(V^2 \cdot \text{Hz}^{-1})$, 此时通过调制器将电学的扰动转换为对激光光场的相位扰动,其功率谱密度 $S_E(\text{rad}^2 \cdot \text{Hz}^{-1})$ 为

$$S_E = \pi^2 S_V / V_\pi^2 \quad (10)$$

式(10)中, V_π 为调制器的半波电压。将式(10)代入式(7)中得

$$R_E(\tau) = E_0^2 \exp(i2\pi\nu_0\tau) \cdot \exp[-S_E f_c (1 - \text{sinc}(2f_c\tau))] \quad (11)$$

由式(11)可知,调制后的光谱中心频率为 ν_0 , 展宽效果取决于 f_c 与 S_E 的值。

2 实验部分

2.1 OptiSystem 仿真

在对式(11)进行数值仿真研究前,首先通过 OptiSystem

软件搭建了相应的激光相位调制展宽系统^[14]，具体模型如图 1 所示。连续波激光器所产生的中心波长为 1 550 nm 的窄线宽激光进入到相位调制器，该相位调制器由噪声源提供的高斯白噪声驱动，噪声信号带宽由该模块的采样率决定，此处设置为 2 THz。改变调制深度主要通过调制器对电信号幅值作归一化处理后再改变其自身在单位电压下对应的相移实现。调制前后的光谱由光谱分析仪模块采集，其中激光原始光谱如图 2 所示。

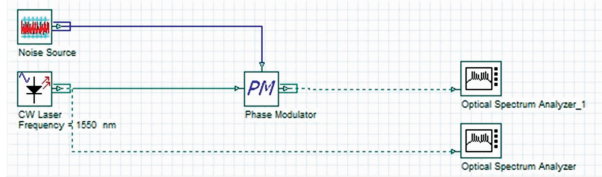


图 1 激光光谱展宽系统的 OptiSystem 仿真模型

Fig. 1 OptiSystem simulation model of laser spectrum broadening system

仿真过程中逐步提高系统的调制深度，与此同时观察调制光谱相应的改变，变化趋势如图 3 所示。当系统处于低调

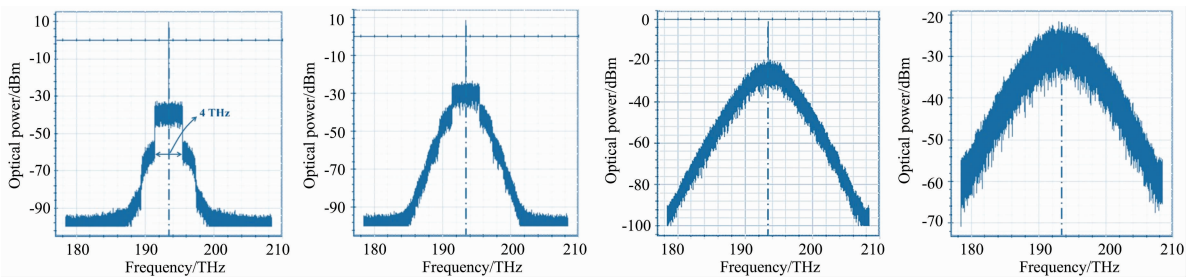


图 3 光谱随调制深度增加的演变过程

Fig. 3 The spectrum evolution of laser signal with modulation depth increasing

基于 OptiSystem 的仿真分析初步表明，信号的带宽直接决定了展宽分量的大小；而与 β 分割线理论相近，当噪声强度低时，展宽只涉及光谱低功率的边翼部分，只有随着强度的提升才能在抑制光载波的同时，得到真正意义上具有更大半高全宽的高斯型光谱。

2.2 数值仿真

联立式(2)与式(11)可以得到高斯白噪声相位调制下的激光光谱形貌。由于谱型主要由信号带宽和相位扰动的功率谱密度决定，因此主要分析 S_E 和 f_c 这两项参数。实际调制中可能存在三种情况：相同信号截止频率下具有不同的功率谱密度，功率谱密度相同但带宽不同以及信号总功率相同，但具有不同的带宽和功率谱密度。

首先对 f_c 作归一化处理，此时随着 S_E 的增加，光谱的变化与 OptiSystem 的仿真结果一致，如图 4(a)所示，由具有高载波分量的“宝塔型”最终变为载波被完全抑制后的光滑高斯谱型，展宽分量也逐渐递加。而在单位信号功率谱密度下提升带宽，也会在进一步抑制载波的同时增加展宽分量，如图 4(b)所示。

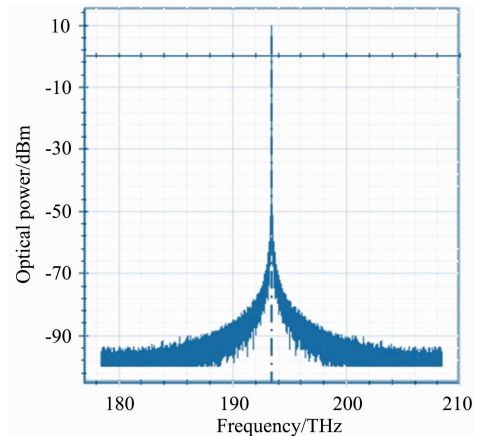


图 2 连续波激光器输出的激光原始光谱

Fig. 2 The original spectrum of CW Laser beam

制深度时，光谱整体呈“宝塔型”，仅在低功率部分展宽明显，最小展宽分量对应 2 倍的噪声信号带宽，且仍然存在有较大的光载波；随着调制深度的增加，光谱逐渐平滑，展宽和载波抑制效果得以提升，并在最终载波完全消失，获得了理想的高斯型光谱。

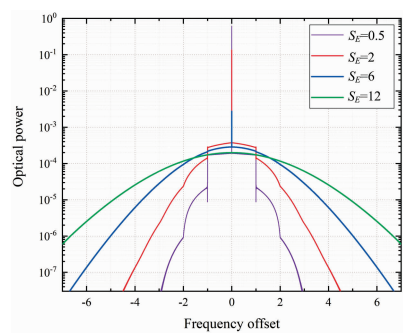


图 4(a) 不同信号功率谱密度下的光谱

Fig. 4(a) Spectra of laser beams with different signal power spectral densities

铌酸锂光电相位调制器都存在一定范围的工作频率以及电信号最大输入功率的限制，因此研究最后一种情况有利于研究者选择合适的器件参数。由图 4(c)可知，在相同的噪声信号功率下改变带宽和功率谱密度的配比，此时残余载波分量始终保持不变，但是高带宽能够实现更大的展宽效果。

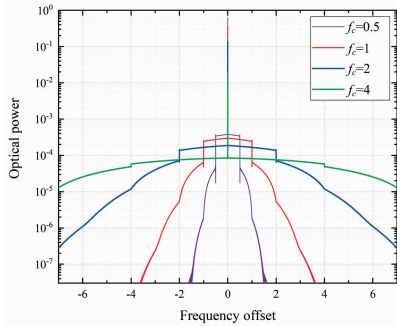


图 4(b) 不同信号带宽下的光谱

Fig. 4(b) Spectra of laser beams with different signal bandwidths

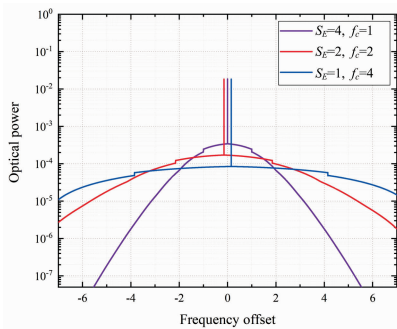


图 4(c) 相同信号功率下的不同光谱

Fig. 4(c) Spectra of laser beams with the same signal power

经过以上研究, 对在不同 S_E 和 f_c 的高斯白噪声调制下的光谱展宽线宽和残余载波分量进行统计分析, 结果如图 5 所示。

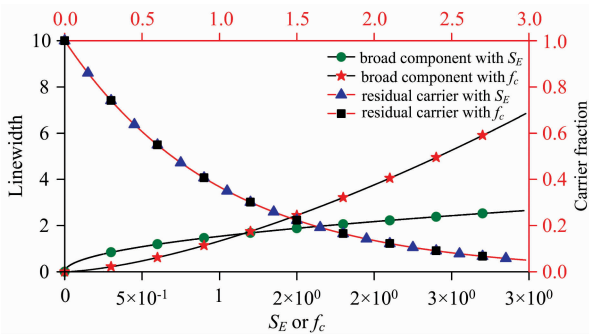


图 5 不同信号功率谱密度及截止频率下的展宽分量线宽及残余载波分量

Fig. 5 Broad spectral component linewidth and residual carrier fraction of different signal power spectral densities and cutoff frequencies

经计算可得, 光谱的展宽分量线宽 $\Delta\nu_b$ 和残余载波 Δp_c 分别为

$$\Delta\nu_b = \sqrt{\frac{8\ln 2}{\pi} S_E f_c^3} \quad (12)$$

$$\Delta p_c = e^{-S_E f_c} \quad (13)$$

因此对于高斯白噪声驱动下的相位调制而言, 载波抑制由信

号总功率决定, 而信号带宽的大小相较于功率谱密度而言对展宽起到更加重要的作用。

3 结果与讨论

3.1 外部相位调制系统

搭建的外部相位调制系统如图 6 所示, 该系统主要涉及光学部分和电学部分。光学部分包括激光与相位调制器。激光采用光迅科技公司生产的 1 550 nm 分布式反馈半导体激光器, 输出光功率 10 mW, 线宽 20 kHz; 调制器为 iXblue 公司的铌酸锂光电相位调制器, 工作带宽 10 GHz, 半波电压 3.7 V。电学部分主要包括信号源, 放大器以及可调衰减器等。高斯白噪声源采用 NoiseWave 公司的 NW10G-M 信号发生模块, 带宽为 10 GHz, 输出功率 -17 dBm, 图 6 中绿色波形为噪声的部分时域图, 幅值统计呈高斯型分布, 黄色波形为噪声的频谱分析图, 其中处在高于 10 GHz 的高频信号功率谱密度会迅速衰减。由于噪声功率过低, 直接驱动调制器无法获得好的展宽效果, 因此需要对信号进行预放大, 并在放大链路中增加可调衰减器来调节信号功率, 在调制器的电学输入端口前加入滤波器改变信号带宽。根据可调衰减器的种类不同, 放大链路的设计方案可以分为两种: 一种为程控式衰减方案, 如 Mini-Circuits 公司的 RUDAT-13G-90, 它可以通过 USB 或 RS232 串行通信接口与上位机进行通信, 从而以 0.5 dB 的步长实时调节衰减量, 这有利于对噪声信号进一步施加反馈控制。但是该方法也存在不足, 主要为自身存在较大的插入损耗, 且在不同频段的插损有所不同, 因此会对白噪声信号的频谱质量造成影响。故在使用 RUDAT-13G-90 可调衰减器时, 前置放大由 Anritsu 公司的 G3H84 (增益 28 dB) 与 Mini-Circuits 的 ZX60-14012L-S+ (增益 12 dB) 实现, 最终经过具有高饱和功率的 ZVA-183W+ (增益 28 dB) 放大输出, 最大输出功率可达 28 dBm 以上。该值也是调制器安全工作范围内的最大输入电功率。此外还可以使用机械式可调衰减器。由于它的插入损耗很小, 因此用另一个 ZX60-14012L-S+ 放大器代替 G3H84, 并将衰减器放置在 ZVA-183W+ 前, 这主要是由于放大链路中只有该放大器处于饱和状态。调制前后的光谱利用 Yokogawa AQ6317C 光谱分析仪进行观测, 它在 C 波段的最高分辨率为 0.01 nm。

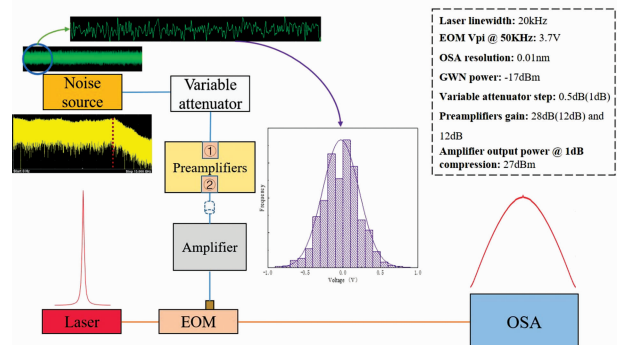


图 6 外部相位调制系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of external phase modulation system

3.2 波长稳定性测试

利用外部相位调制技术进行光谱展宽的优势之一是不会劣化激光的光谱质量，防止了对激光波长稳定性造成影响。

因此在观测光谱调制效果前，首先基于扫描式法布里—珀罗共焦腔对调制前后的激光频率漂移进行测试，测试系统如图 7 所示^[15]。

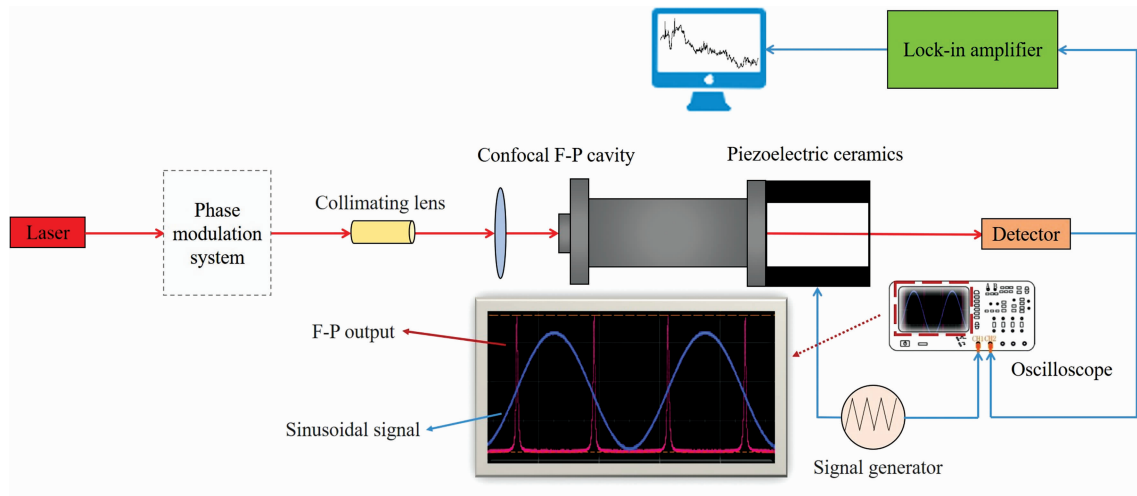


图 7 激光波长稳定性测试系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of laser wavelength stability test system

光束经准直透镜进入共焦腔后会发生多光束干涉增强，通过信号发生器对压电陶瓷施加正弦驱动电压使腔长发生周期性变化，从而由光电探测器探测出规律性的谐振峰，谐振峰在时域上的波动即反映了波长的漂移，具体漂移量可由干涉仪的自由光谱范围计算得到。测试前首先利用 NKT Photonics 公司生产的超窄线宽可调谐激光器 BASIK X15 标定，然后将探测信号输入至锁相放大器进行解调，最终以标定结果为基准求得当前激光光谱的漂移特性。激光器预热后，对其在一小时内的稳定工作段进行重复性测试，实验结果表明调制前后的最大频率漂移量分别为 32.7 和 29.8 MHz，可以证实调制后的激光仍具有良好的波长稳定性。

3.3 激光光谱测量结果

如图 8 所示，红色表示激光的原始光谱，以最大功率电信号驱动下的展宽光谱为蓝色虚线表示。由于激光的线宽远远小于光谱分析仪的分辨率，因此红色谱线仅表现为对光脉冲的响应，实际线宽由延时自外差系统测得。而对展宽后的光谱进行测量时，考虑到载波可能未完全抑制的缘故，半高全宽处仍保持不变，以及调制使光谱在各个波长的功率分量整体下降，导致光束经自外差所得的差频电信号峰值功率过低，淹没于频谱分析仪的背景噪声中难以分辨，无法继续使用延时自外差对线宽进行简单的测量。将信号功率 28 dBm, $f_c = 10$ GHz 以及 $V_\pi = 3.7$ V 代入式(10)和式(12)，经计算可得此时展宽分量约为 60 GHz，已经达到了光谱分析仪的可分辨范围，能够直接进行探测。对调制后的光谱展宽部分作高斯拟合，其线宽为 65 GHz，而载波也得到很好地抑制，与理论相一致。

进一步，通过三个截止频率分别为 10.5, 6.5 和 1.5 GHz 的低通滤波器调整驱动信号的带宽，所得噪声信号由 Agilent N9030A 频谱分析仪测得，如图 9(a)所示，相应的调制光谱如图 9(b)所示。以未滤波和经过 10.5 GHz 低通滤波

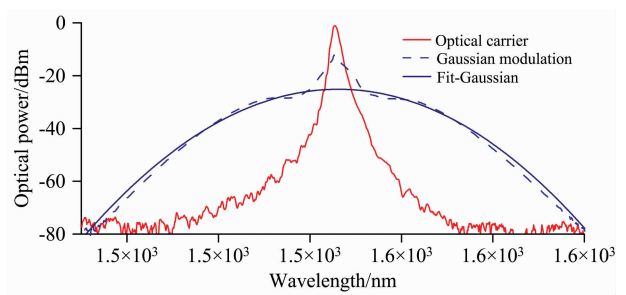


图 8 调制前后的光谱图对比

Fig. 8 Comparison of spectra of laser beam with and without modulation

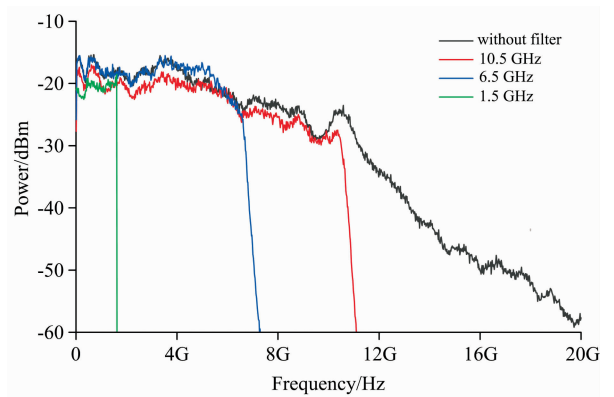


图 9(a) 滤波前后的高斯白噪声信号

Fig. 9(a) Gaussian white noise signals with and without filtering

后的测试结果为例，相较于滤波前，频率在 10.5 GHz 以上的信号被基本剔除。尽管这部分信号谱密度较低，但是仍然

可以作用到光谱的边翼部分导致展宽，因此虽然主要的白噪声信号得以保留，但是光谱在低功率部分的谱宽仍然明显降低，而之后随着滤波范围的增加，调制的展宽效果也会逐渐变弱。

图 10(a)表示采用机械式可调衰减器时，分别将衰减量设置为 0, 4, 8 和 12 dB 的噪声信号频域图，图 10(b)为对应的调制光谱。尽管由于光谱分析仪的分辨率有限，很难得到准确的残余载波量，但是可以看出，当衰减提升至 4 dB 时，光谱展宽虽有所减少，然而残余光载波分量也同样降低。展宽部分的微弱减小是由于 0 dB 下的 ZVA-183W+放大器处于饱和状态，其放大效果已经不再处于线性区间，因此前置一个 4 dB 的衰减器并不会导致其输出功率发生等量衰减；同时，由于二者的电信号总功率相差不大，但是 0 dB 时在时

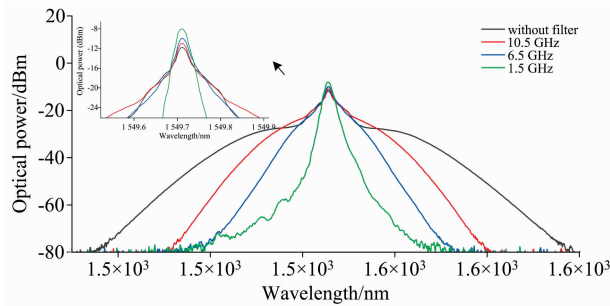


图 9(b) 不同信号带宽下的光谱图

Fig. 9(b) Spectra of laser beam with different signal bandwidths

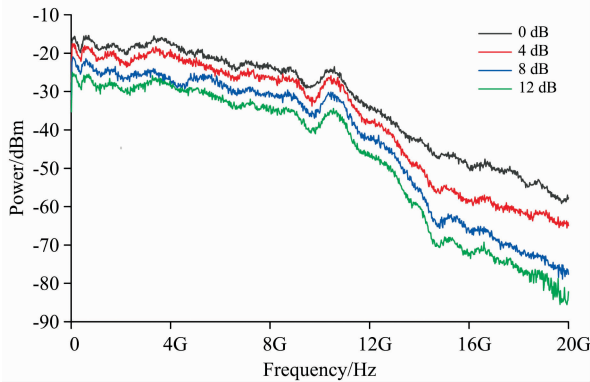


图 10(a) 不同衰减下的高斯白噪声信号

Fig. 10(a) Gaussian white noise signals of different attenuations

域上呈高斯统计分布的信号波形中更多的成分趋于饱和状态，使得随机相位调制对光场瞬时频率的影响降低，载波抑制效果也同样如此^[9]。而对于 8 和 12 dB 及更高的衰减值，此时光谱分析仪已经很难作出更精细地分辨，因此会与未调制时的激光本征光谱接近。

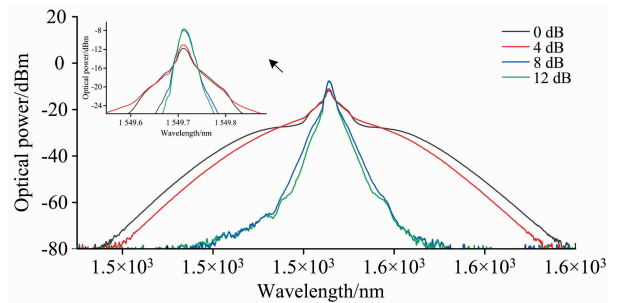


图 10(b) 不同信号衰减下的光谱图

Fig. 10(b) Spectra of modulated laser beam with different signal attenuations

通过调制器向光场的相位中引入高斯白噪声能够对激光光谱进行有效展宽。系统应当选择较大的工作带宽以提升展宽效果，尽管这意味着更高的成本，而电信号的功率也应尽可能高，否则当噪声谱密度相对于频率较小时，展宽只能涉及功率较低的边翼部分。光谱由光谱分析仪所测得，虽然受分辨率不足的限制难以进一步地对其进行更高精度表征，但是现有测试与分析表明实验结果与理论和仿真都能够保持一致。

4 结 论

基于光谱与光场相位噪声的关系，从原理上论证了通过高斯白噪声相位调制展宽激光光谱的可行性，结合 OptiSystem 和数值仿真得到了不同噪声带宽和功率谱密度下光谱的演变过程，并计算出展宽线宽和残余载波分量的理论表达式。最后搭建了 10 GHz 的相位调制系统对本征线宽 20 kHz 的半导体激光器进行调制，通过光谱分析仪观测了不同滤波和衰减下的光谱。实验结果表明，外部调制对于激光的波长稳定性不会产生影响，而基于高斯白噪声调制的光谱不包含边带和次峰，光载波抑制效果好，且在 28 dBm 的功率下展宽线宽最高可达 65 GHz，是一种优秀的光谱展宽方案。

References

[1] LU Dan, YANG Qiu-lu, WANG Hao, et al(陆 丹, 杨秋露, 王 皓, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2020, 47 (7): 0701001.

[2] Yao Y, Zou C, Yu H, et al. Journal of Semiconductors, 2018, 39(11): 114004.

[3] Lloyd S, Digonnet M, Fan S. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(13): 2070.

[4] Chamoun J, Digonnet M. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(13): 2839.

[5] LIU Ya-kun, WANG Xiao-lin, SU Rong-tao, et al(刘雅坤, 王小林, 粟荣涛, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2017, 66 (23): 234203.

[6] YANG Lei, ZHENG Jia-jin, HAO Li-yun, et al(杨 磊, 郑加金, 郝丽云, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2017, 44 (9): 0901009.

- [7] DU Wen-bo, WANG Xiao-lin, HAN Kai, et al(杜文博, 王小林, 韩凯, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2011, 38(11): 1105009.
- [8] Chamoun J, Digonnet M. Optics Letters, 2016, 41(24): 5664.
- [9] Chamoun J, Digonnet M. Optics Letters, 2017, 42(8): 1600.
- [10] ZHANG Gui-cai, YU Hao, MA Jun, et al(张桂才, 于浩, 马骏, 等). Navigation Positioning & Timing(导航定位与授时), 2017, 4(6): 86.
- [11] Zhou K, Zhao Q, Huang X, et al. Optics Express, 2017, 25(17): 19752.
- [12] QI Xiang-yu, CHEN Chao, QU Yi, et al(齐翔羽, 陈超, 曲轶, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2019, 39(8): 2354.
- [13] Domenico G, Schilt S, Thomann P. Applied Optics, 2010, 49(25): 4801.
- [14] Ma J, Li M, Liang H. Proc. SPIE, 2020, 11545: 115450H.
- [15] Zou K, Bi R, Chen K, et al. Optical Fiber Technology, 2021, 61: 102403.

Laser Spectrum Broadening Method Based on Phase Modulation of Gaussian White Noise

YAN Jing-tao¹, MIAO Li-jun^{1*}, MAO Jian-feng², SHI Jin¹, HUANG Teng-chao¹, CHE Shuang-liang¹, SHU Xiao-wu¹

1. State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. Jiangxi Traffic Senior Technical School, Nanchang 330105, China

Abstract Laser is a kind of common light source in modern optics. It is of great significance to analyze its spectrum width characteristics for research. Because the full width at half maximum (FWHM) of high-performance narrow-linewidth lasers is usually within tens of MHz, it is very difficult for them to directly meet the application requirements in the fields that need broadband source and give full play to their advantages in terms of cost and performance, which also limits the development of laser to a certain extent. If the laser is directly modulated to achieve linewidth broadening, it will cause serious frequency drift and destroy its important frequency stability. In order to obtain the wide spectrum without degrading wavelength stability, an external phase modulation method using Gaussian white noise (GWN) as a driving signal is reported. Based on the relationship between laser phase noise and spectral characteristics, the broadening effect of phase noise on the spectrum is clarified through theoretical calculation. The spectrum evolution process with different parameters of white noise is analyzed based on OptiSystem optical simulation tool and numerical simulation. The noise source with high power and wide bandwidth is needed for broadening and carrier suppression of high efficiency. The external phase modulation system uses a 10 GHz noise source. The signal is increased from -17 to 28 dBm by two preamplifiers and a high saturation output power amplifier to drive a lithium niobate (LiNbO_3) electro-optic phase modulator with the half-wave voltage of 3.7 V. The low-pass filter and variable attenuator are added to the amplification link to adjust the signal parameters. The research object is a distributed feedback (DFB) semiconductor laser with an initial linewidth of 20 kHz. It can be seen by observing and comparing the laser spectra with and without modulation using an optical spectrum analyzer (OSA) that the experimental results are consistent with the theory and simulation. The maximum broadened component is up to 65 GHz and the carrier is also obviously suppressed. In addition, the laser frequency drift is evaluated based on the scanning Fabry-Pérot confocal cavity. It is proved that the external modulation does not affect the wavelength stability of the laser, so the phase modulation scheme of GWN can achieve superior spectrum broadening. Because the modulated spectrum has no sideband or minor peak and the broadened component is several times the modulation bandwidth, GWN has obvious advantages compared with others, such as sinusoidal signal and pseudo-random binary sequence (PRBS) signal. This promising method does not depend on the intrinsic linewidth of laser, and the work can be used as a reference for the research of phase modulation and spectrum broadening.

Keywords Laser linewidth; Phase modulation; Spectrum broadening; Gaussian white noise

* Corresponding author

(Received Jan. 27, 2021; accepted Jun. 7, 2021)