

DFB 半导体激光器啾啾系数的测量

刘琳霞^{1,2}, 徐利³, 王晴岚³

(1.华中科技大学 物理学院,武汉 430074;

2.河南工学院 物理研究所,河南 新乡 453003;3.湖北汽车工业学院 理学院,湖北 十堰 442002)

摘要:从激光在色散光纤中的传播特性出发,给出了定量测量 DFB(Distributed Feedback)半导体激光器啾啾系数的方法.通过利用矢量网络分析仪和色散光纤搭建的测量系统准确测量了 DFB 半导体激光器样品的啾啾系数.该测量方案对于长距离光电电路的设计有重要的指导意义.

关键词:DFB 半导体激光器;啾啾系数;矢量网络分析仪

中图分类号:O431;TN248.4

文献标志码:A

由于 DFB 半导体激光器具有单模、可直接调制以及相对低廉的价格等特性,因此它在光电通讯网络中起着非常重要的作用^[1].在 NRZ(Non-Return to Zero)调制和 RZ(Return to Zero)调制中^[2],DFB 半导体激光器的输出强度是信号的调制载波.而 DFB 半导体激光器的啾啾特性,导致输出的光强相位也被进行了额外的调制,即啾啾效应^[3]

$$\Delta v(t) \cong \frac{\alpha}{2P(t)} \Delta P(t), \quad (1)$$

其中 $P(t)$ 为激光的光功率, α 为线宽增强因子^[4].由于 α 是 DFB 半导体激光器自身的特性,其大小反映了啾啾效应的强弱,因此也被称为啾啾系数.这种相位上的额外调制使得激光信号频率发生展宽,经过长距离光纤传输时,由于光纤内的色散效应,不同频率的光信号到达接收处的时间有不同的延迟,导致接收端眼图劣化,使得误码率提升^[5-6].在低速短距光纤传输中,啾啾效应的影响较小,但是随着传输速率的不断提高,即便是在短距离的光纤通信中(例如数据中心),啾啾效应已经不能忽略.从(1)式中可以看出,如果测量 α 的精度足够高,就能够还原出 DFB 半导体激光器的啾啾特性^[7].因此,本文对 DFB 半导体激光器的啾啾特性进行了仔细分析,得到 α 的精确拟合方法,通过选择合适的色散补偿光纤来提升光信号的传输性能,并且结合实验结果验证了该方法的可行性.

1 理论分析

1.1 光纤中的色散

为简单起见,假设 DFB 激光器输出的光信号为平面波,具有如下形式

$$E_{in}(t) = \sqrt{P_{in}(t)} \exp(i\omega_0 t + \varphi), \quad (2)$$

其中 $P_{in}(t)$ 为光功率, ω_0 为 DFB 激光器出射光的频率, φ 是初始相位.(2)式对应的傅里叶变换为

$$E_{in}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} E_{in}(t) \exp(-i\omega t) dt. \quad (3)$$

假设光纤长度为 L ,那么光信号在光纤中传播后,将会附加上一个传播项 $\exp(-i\beta L)$,其中 β 为波矢^[8].在理

收稿日期:2018-07-15;修回日期:2018-09-12.

基金项目:国家自然科学基金(11305057);湖北汽车工业学院博士科研启动基金(BK201302).

作者简介:刘琳霞(1978—),女,河南开封人,河南工学院副教授,华中科技大学博士后,研究方向为精密测量,引力波.

通信作者:王晴岚(1984—),女,浙江海盐人,湖北汽车工业学院讲师,马克斯-普朗克研究所(AEI)博士后,研究方向为光学精密测量,E-mail:wangql_lx@huat.edu.cn.

想情况下, β 为常数,但是由于光纤介质存在色散效应,此时的 β 为激光波长的函数.考虑到 DFB 半导体激光器是单模输出,波长变化非常小,利用泰勒级数将 β 在 DFB 半导体激光器的中心频率 ω_0 处进行展开

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \tau(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \frac{d\tau}{d\omega} (\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (4)$$

其中 τ 表示群延时,而色散项为 $\frac{d\tau}{d\omega} = -\frac{d\tau}{d\lambda} \frac{\lambda^2}{2\pi c}$,这里 λ 和 c 分别表示真空中激光的波长和光速.

光信号经过长度为 L 的光纤传播后,输出的光信号在频域里就等于输入光信号乘上附加的相位变化

$$E_{\text{out}}(\omega) = E_{\text{in}}(\omega) \exp(-i\beta L). \quad (5)$$

将(4)式带入到(5)式中,再进行反傅里叶变换,可以得到输出光信号的时域的表达式为^[9]

$$E_{\text{out}}(t) = \exp(i\omega_0 t - i\beta_0 L) \exp\left[\frac{iL}{2} \frac{d\tau}{d\omega} \frac{d^2}{dt^2} \sqrt{P_{\text{in}}(t - \tau L)} \exp[i\varphi(t - \tau L)]\right]. \quad (6)$$

这个式子比较复杂,但是仍然能从中看到其表示的物理含义,其中 $(t - \tau L)$ 表示接收端的信号是在输入端 τL 之前传输过来的,输入信号的二阶微分则表示色散对信号的影响.由于 $\beta_0 L$ 项和 τL 项仅贡献的是与时间

无关的相位差,为方便起见,在后面的计算中可以将其忽略掉,同时引入参数 $F = -\frac{L}{2} \frac{d\tau}{d\omega}$,于是(6)式可写为

$$E_{\text{out}}(t) = \exp(i\omega_0 t) \exp\left[-iF \frac{d^2}{dt^2} \sqrt{P_{\text{in}}(t)} \exp(i\varphi_{\text{in}})\right]. \quad (7)$$

进一步地,将 $E_{\text{out}}(t)$ 写成 $E_{\text{in}}(t)$ 加上一个小量的形式 $E_{\text{out}}(t) = E_{\text{in}}(t) + \Delta E(t)$,其中 $\Delta E(t) = \sqrt{P_{\text{in}}(t)} \exp(i\omega_0 t) \exp(i\varphi_{\text{in}}) [\exp(-iF \frac{d^2}{dt^2}) - 1]$.由此可计算得到输出端的光功率 $P_{\text{out}}(t)$ 和相位 $\varphi_{\text{out}}(t)$ 分别为

$$P_{\text{out}}(t) = P_{\text{in}}(t) + 2\text{Re}\{\sqrt{P_{\text{in}}(t)} \exp(-i\varphi_{\text{in}})\} [\exp(-iF \frac{d^2}{dt^2}) - 1] [\sqrt{P_{\text{in}}(t)} \exp(i\varphi_{\text{in}})], \quad (8)$$

$$\varphi_{\text{out}}(t) = \varphi_{\text{in}}(t) + \text{Im} \frac{[\exp(-iF \frac{d^2}{dt^2}) - 1] [\sqrt{P_{\text{in}}(t)} \exp(i\varphi_{\text{in}})]}{\sqrt{P_{\text{in}}(t)} \exp(-i\varphi_{\text{in}})}. \quad (9)$$

(8)和(9)式分别描述了一般情形下,经过一段色散光纤后,光功率和相位的变化,但是这两个式子比较复杂,并没有给出输出场强度和相位之间的清晰的关系,下面的讨论将加上小信号这个条件.

1.2 小信号下光纤的传递函数

在小信号条件下,可以认为输入光功率 $P_{\text{in}}(t) = P + \Delta P_{\text{in}}(t)$,且光信号的变化部分远远小于其恒定部分,即 $\Delta P_{\text{in}} \ll P_{\text{in}}(t)$,于是(8)和(9)式可简化为

$$P_{\text{out}}(t) = P_{\text{in}}(t) + 2\text{Re}\left\{P \left[\exp\left(-iF \frac{d^2}{dt^2}\right) - 1\right] \left[\frac{\Delta P_{\text{in}}(t)}{2P} + i\varphi_{\text{in}}\right]\right\}, \quad (10)$$

$$\varphi_{\text{out}}(t) = \text{Im}\left\{\exp\left[-iF \frac{d^2}{dt^2}\left(\frac{\Delta P_{\text{in}}(t)}{2P} + i\varphi_{\text{in}}\right)\right]\right\}. \quad (11)$$

进一步地将算符 $\exp\left(-iF \frac{d^2}{dt^2}\right)$ 分成实部和虚部,即 $\exp\left(-iF \frac{d^2}{dt^2}\right) = \cos\left(F \frac{d^2}{dt^2}\right) - i \sin\left(F \frac{d^2}{dt^2}\right)$,就可以得到输出信号和输入信号之间的一个简单的矩阵形式关系

$$\begin{pmatrix} \frac{\Delta P_{\text{out}}(\omega)}{2P} \\ \varphi_{\text{out}}(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\omega^2 F) & \frac{-i2P \sin(\omega^2 F)}{\omega} \\ \frac{-i\omega \sin(\omega^2 F)}{2P} & \cos(\omega^2 F) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\Delta P_{\text{in}}(\omega)}{2P} \\ \varphi_{\text{in}}(\omega) \end{pmatrix}. \quad (12)$$

对于 DFB 半导体激光器来说,相位调制的响应 H_{pm} 为^[10]

$$H_{\text{pm}}(\omega) = \alpha \left(1 - \frac{\omega_c}{\omega}\right). \quad (13)$$

将(13)式带入到(12)式中,便可得到 DFB 半导体激光器的光纤输入端到输出端的强度调制特性

$$\Delta P_{\text{out}}(\omega) = \left[\cos(F\omega^2) + i\alpha \sin(F\omega^2) \frac{i\omega + \omega_c}{\omega} \right] \Delta P_{\text{in}}(\omega). \quad (14)$$

从(14)式可以看出,若能调制DFB半导体激光器的功率,并测量经过光纤传输后的响应,便可以拟合出啁啾系数 α 的准确值.

2 测量装置

根据前面的理论分析,搭建如图1所示的系统进行DFB半导体激光器的啁啾系数测量.测量系统的主体是一台矢量网络分析仪(Vector Network Analyzer, VNA),矢量网络分析仪的一端接到待测DFB半导体激光器的高频输入口.为了保证DFB半导体激光器处于工作发光状态,还需要给激光器加上合适的阈值电流^[11].这部分可通过一台直流电源来实现.

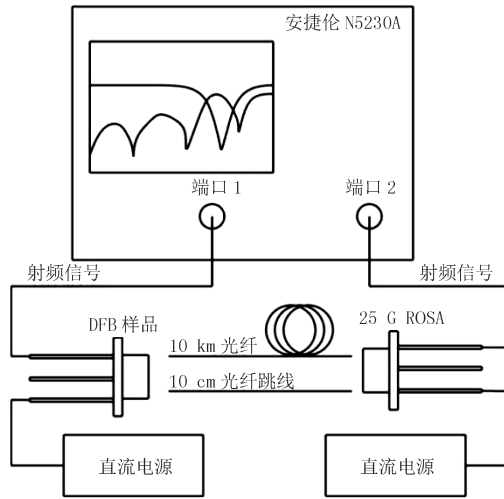


图1 啁啾系数测量装置示意图

DFB半导体激光器的输出经过一段10 km长的单模光纤后,进入到光电二极管转化为高频的电信号,再传输到矢量网络分析仪的另一端.通过VNA测量半导体激光器的 S_{21} 参数,可得到系统的传递函数,测量结果如图2所示.从图2中可见,数据在10 GHz处出现明显的跌落,除此之外还有很多不规则的波动和毛刺,存在这些的原因主要是测量中包括了光电二极管,各种夹具以及连接器的影响.这些额外的效应会影响啁啾系数的测量结果,必须从测量数据中去除掉.去除这些效应的影响有2种方法:第一种是建立整条链路的等效模型,从测量结果中扣除,但这种方法操作起来非常麻烦而且容易出错;第二种方法是扣除法^[12],将10 km的光纤换成10 cm的短纤进行重复测量,2次测量的参数如DFB半导体激光器和光电二极管的偏置电压、矢量网络分析仪的参数设置等都必须一致.由于在2次测量中,光电二极管、连接器等部件的影响是一致的,因此能够从测量结果中扣除掉.在采用了扣除法再次进行实验后,10 cm短光纤的测量结果如图2所示.

3 啁啾系数的测量结果

将2次测量结果中共同的噪声部分采用扣除法进行处理,结果如图3所示.实验曲线在10 GHz处的明显跌落反映了光信号的相位与强度之间的耦合,在其余频段的干扰明显降低.利用(13)式对数据进行非线性拟合,得到该DFB半导体激光器的啁啾系数为 $\alpha = 2.32 \pm 0.01$,相对测量精度达到0.4%.拟合效果很好.验证了理论分析结果.

由于啁啾系数由DFB半导体激光器的本身结构确定,对于不同的样品,其啁啾系数也会有不同,因此对

于不同批次的 DFB 半导体激光器,都需要仔细测量其啁啾系数,来保证光电链路系统的设计符合实际需求.由于该方法的测量精度高,对于其他一些啁啾系数较小的光电器件,如量子井激光器^[13]、Mach-Zehnder 调制器^[14],也是同样适用的.

DFB 半导体激光器的特性(例如输出光功率、波长等)是与芯片温度相关的^[15],因此下一步的工作是测量啁啾系数与芯片温度之间的关系,希望能更加全面地描述 DFB 半导体激光器的啁啾特性.

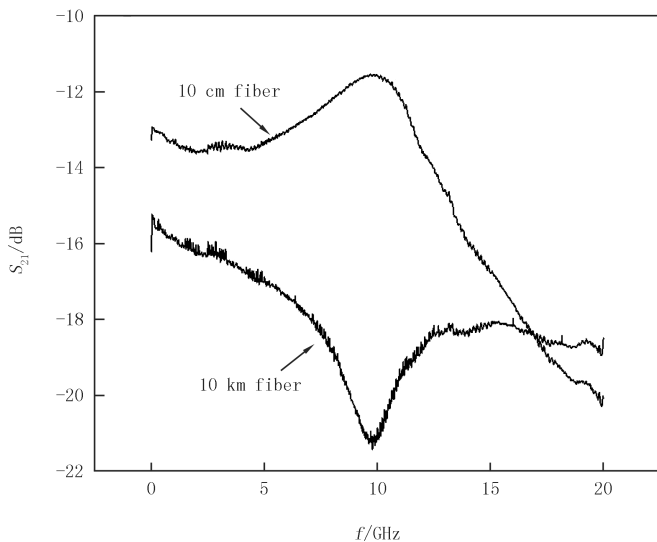


图 2 10 km 及 10 cm 光纤的 DFB 半导体激光器的传递函数

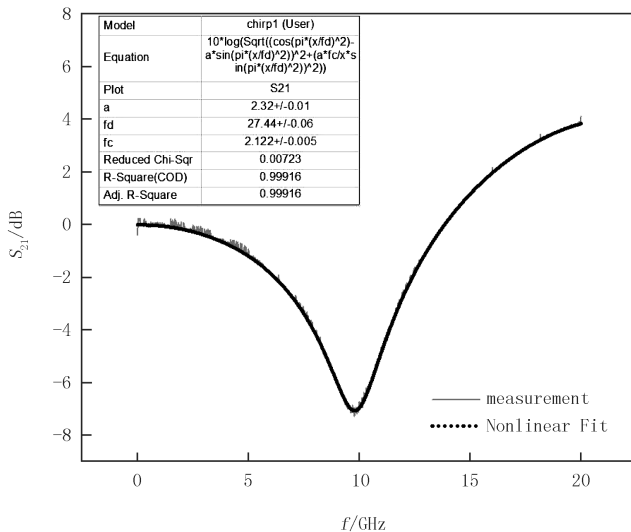


图 3 采用扣除法后的传递函数拟合结果

4 结 论

通过对半导体激光器在色散光纤中的传播特性的分析研究,在小信号输入条件下,得到激光器的输入与输出的矩阵关系,并可从中拟合得到啁啾系数.根据理论分析在搭建了测量系统后对该方案进行了测试,由于受到光电二极管、夹具、连接器等外界因素的干扰,噪声较大.在采用两根不同长度的光纤进行比对实验后,将相同的噪声部分进行扣除,有效降低了外界干扰,从而拟合得到啁啾系数.该方法的测量结果准确可靠,测量过程方便,对于深入理解 DFB 半导体激光器的啁啾特性以及光电链路的设计有较大的指导意义.

参 考 文 献

- [1] Kim D, Shim J, Keh Y C, et al. Design and fabrication of a transmitter optical subassembly (TOSA) in 10-gb/s small-form-factor pluggable (XFP) transceiver[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2006, 12(4): 776-782.
- [2] Hayee M I, Willner A E. NRZ vs. RZ in 10-40 Gbit/s dispersion-managed WDM transmission systems[C]//Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. Piscataway: IEEE Press, 1999: 407-408.
- [3] 祝宁华. 光电子器件微波封装和测试: Microwave design and characterization of optoelectronics devices and packaging [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] Koch T L, Linke R A. Effect of nonlinear gain reduction on semiconductor laser wavelength chirping [J]. Applied Physics Letters, 1998, 48(10): 613-615.
- [5] 刘山亮, 郑宏军. 短脉冲在色散平坦光纤中传输前后波形、相位和啁啾测量的实验研究[J]. 中国激光, 2006, 33(2): 199-205.
- [6] 苏卉, 刘凤海, 范崇澄. 激光器绝热啁啾对光纤通信系统传输特性的影响[J]. 高技术通讯, 1997(8): 22-25.
- [7] 郑宏军. 啁啾脉冲在光纤通信系统中的传输特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [8] Petermann K. FM-AM noise conversion in dispersive single-mode fibre transmission lines [J]. Electronics Letters, 1990, 26(25): 2097-2098.
- [9] Wang J M, Petermann K. Small Signal Analysis for Dispersive Optical Fiber Communication Systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 1992, 10(1): 96-100.
- [10] Bjerkan L, Rgyset A, Hafskjaer L, et al. Measurement of Laser Parameters for Simulation of High-speed Fiberoptic Systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(5): 839-850.
- [11] 肖勇, 陈福深. 基于等效电路模型的半导体激光器直流偏置分析[J]. 半导体光电, 2011, 32(1): 38-40.
- [12] 王晴岚, 徐利. 半导体激光器等效电路模型及其参数提取[J]. 半导体光电, 2016, 37(2): 186-189.
- [13] Dorgeuille F, Devaux F. On the transmission performances and the chirp parameter of a multiple-quantum-well electroabsorption modulator[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 30(11): 2565-2572.
- [14] Schiess M, Carlden H. Evaluation of the chirp parameter of a Mach-Zehnder intensity modulator[J]. Electronics Letters, 1994, 30(18): 1524-1525.
- [15] 李蔚, 张翠红, 李海涛, 等. 直接调制 DFB 激光器调制特性的温度补偿技术研究[J]. 光通信技术, 2003, 27(12): 35-36.

Measurement of the chirp parameter in DFB semiconductor laser diode

Liu Linxia^{1,2}, Xu Li³, Wang Qinglan³

(1. School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Institute of physics, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China;

3. College of Science, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China)

Abstract: By discussing the propagation properties of laser in a dispersive fiber, a method of measuring the chirp parameter of a DFB laser diode was proposed and measured by a system consisting of a vector network analyzer and long dispersive fiber, which would be helpful to the design of long range optical communication performance.

Keywords: DFB laser diode; chirp parameter; vector network analyzer

[责任编辑 杨浦]