

半导体激光器的非线性失真特性及预失真补偿研究

柯熙政, 邓莉君

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 在大气激光通信中, 半导体激光器是最为常见的光源器件, 它的特性指标对整个系统的性能影响较大。首先对激光器的非线性进行建模, 然后详细讨论了半导体激光器的线性化方法和映射函数的建立过程, 最后根据激光器的现有工作状态进行实际测量, 得到实际的激光器的 $I-V$ 特性曲线。基于 Volterra 级数理论建立半导体激光器的非线性模型并进行曲线拟合得到三次多项式系数, 设计预失真补偿法方法对激光器的非线性效应进行校正, 并通过实验验证了该方法的有效性。

关键词: 大气激光通信; 半导体激光器; 非线性; 直接强度调制

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3204-07

Characteristic of nonlinear distortion and predistortion compensation of semiconductor laser

Ke Xizheng, Deng Lijun

(College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In the laser communication, semiconductor laser is the most common light source device, which has a great influence on the performance of the whole system. The nonlinear model of the laser was modeled, then the linear method and the mapping function of the semiconductor laser were discussed. Finally, the $I-V$ characteristic curve of the laser was obtained according to the actual working conduction. Based on the Volterra series theory, the nonlinear model of the semiconductor laser was established and the three polynomial coefficients were obtained. The method of predistortion compensation was designed to correct the nonlinear effect of laser, and the validity of the method was verified by experiments.

Key words: atmospheric laser communication; semiconductor lasers; nonlinear; direct intensity modulation

收稿日期: 2015-03-20; 修订日期: 2015-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(61377080); 西安市科技计划项目(CXY1350(1))

作者简介: 柯熙政(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事大气激光通信及信号处理等方面的研究。Email: xzke@xaut.edu.cn

0 引言

用于直接调制的半导体激光器,需要激光驱动单元提供调制电流和偏置电流,调制电流和偏置电流的大小主要取决于激光二极管的特性。直接强度调制方式对激光器的非线性性能指标要求较高,而且激光器本身是具有阈值特性的非线性器件,其非线性在副载波信号的激励下会产生各阶谐波失真,如不采取措施加以抑制,会对信号接收质量产生严重影响。而一般实际的激光器无法满足非线性性能指标,如果激光器的工作点选择不合适,对信号的影响更是显而易见的。因此,通过分析激光器的非线性失真对副载波信号的影响,寻找合适的方法进行预失真补偿,有效改善系统性能,对大气激光通信系统的发展具有积极的现实意义。

对中高速度调制的半导体激光器的非线性采用的分析方法主要有两种:一种是从激光器的速率方程出发建立数学模型,根据激光器的几何参数和光波场的物理参数提出边界条件来简化求解过程,近似地估计出谐波失真或数值解。1992年,C.Y. Kuo对半导体激光器非线性产生的几种机理(弛豫振荡、空间烧孔、增益饱和)都进行了数学建模和定量分析,并与实际的测试数据进行了比对^[1]。参考文献[2]中詹玉书等人对半导体激光器的非线性进行了理论分析,得出了计算二阶、三阶失真的理论公式。在参考文献[3]中研究了大信号直接调制激光器时的非线性。这种方法也是国内外学者普遍采用的方法。另一种方法是根据现有激光器的工作状态进行实际测试,然后对测得的数据进行参数提取和曲线拟合,直接得到系统的非线性传递函数。1998年,王新宏等人首次提出激光器的线性分析方法,并验证了此种分析方法的有效性^[4]。

对于激光器非线性失真的抑制,国内外学者也进行了许多研究。参考文献[5]克服LD非线性失真的方法是将调制电流通过一个合适的非线性器件,使得修正后的信号通过激光器时的输出信号不产生失真。参考文献[6]中是将信号中的各高次谐波分量分别进行非线性补偿,合成后再通过激光器,抵消掉来自激光二极管的各高次谐波分量,以保证输出信号的质量。

1 激光器的非线性建模

动态非线性^[7-9]的分析方法出发点是速率方程,虽然可以推导出光子与载流子的变化关系以及谐波分量,但是必须要已知激光器和光波场的几何参数和物理参数。对于实际用到的激光器,生产厂商一般不提供这些参数信息,往往这些参数因不能直接测量而使数值无法准确地得到。尤其是对于模拟调制的激光器,激光器的工作状态与其线性性能密不可分,传统的理论分析方法无法给出具体的较为精确的分析结果,只能给出一定数量级的结果。从求解速率方程到得出非线性二次和三次谐波分量的数值,整个计算过程相对繁琐,各步计算中一般都要作近似地简化,因累积的近似误差而导致分析结果的精确性降低。另外,分析结果往往得到一些较为复杂的表达式或数值结果,不易与测试参数进行比较,从而降低了分析的作用。

1.1 静态模型的分析方法

从信号分析的角度来说,激光器中的载流子数变换成光子数的行为可以等效为一种输入—输出关系的信号变换对。如果采用宏观可测参量注入电流作为这个信号变换过程的激励并且输出光功率作为响应,在时域中,激光器调制过程中注入电流与输出光功率的关系可以用输入—输出映射函数来表征。非线性失真是信号变换的产物,因而分析激光器的非线性失真可从映射函数的角度来分析。非线性失真可以简单地概括为在无失真信号的激励下,输出响应信号在时域中产生了波形畸变失真,在频域中则产生了谐波分量。

在这里采用黑箱建模分析法^[9],即通过分析所测器件的外部特性,用各种测试信号对器件进行测试,分别记录在各种测试信号下的响应,通过对测试结果的归纳总结,从中构造出能够反映大部分测试结果的数学模型。这种方法的优势在于不需要进行复杂的公式推导,仅仅依据实际的测试数据就能与激光器的本征特性较为接近。

在连续工作条件下,激光器的非线性失真主要由 $I-L$ 特性曲线的非线性决定^[10-11]。对于文中工作在几 MHz 频段的激光器,产生非线性失真的主要来源是激光器与频率无关的非线性。应用大功率、高效

率、低阈值的激光器本身具有较好的线性,可认为此时的激光器是一个弱非线性系统。

对于半导体激光二极管而言,利用 $I-L$ 特性曲线可以对激光器的非线性失真进行近似估计,但 $I-L$ 特性曲线一般只表征激光器的静态特性。尽管激光器在中高频调制时和静态工作时的微观行为是有差别的,但就输入电流与输出光功率的对应关系来说,其数学表达式,甚至在数值关系上都是很相近的。所以 $I-L$ 特性曲线是映射函数的一个很好的数值近似。

1.2 映射函数的建立

对于一个非线性动态系统,为了得到映射函数的精确数学表达式,一般采用级数分析法来描述通信系统的非线性失真,其对输入信号的响应一般可以表示为一个卷积序列之和:

$$y(t) = \sum_{n=0}^{\infty} y_n(t) \quad (1)$$

其中

$$y_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n) \prod_{j=1}^n x(t-\tau_j) d\tau_j \quad (2)$$

公式(2)为非线性动态系统对输入函数 $y(t)$ 的输入—输出关系的泛函数表达式,其中 $y_n(t)$ 为系统的 n 阶输出, $h_n(t)$ 为系统的 n 阶核或 n 阶冲激响应。

对于一个普通激光器而言,系统一般是弱非线性系统,故可忽略三次以上的响应。公式(1)可简化为:

$$y(t) = \sum_{n=0}^3 y_n(t) \quad (3)$$

激光器的张弛振荡频率在几个或几十个量级,由于在副载波频段内为瞬时响应,则可将公式(2)中的核表示成如下特殊形式:

$$h_n(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_n) = a_n \delta(\tau_1) \delta(\tau_2) \cdots \delta(\tau_n) \quad (4)$$

则公式(3)可简化为幂级数展开:

$$y(t) = a_0 + a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + a_3 x^3(t) \quad (5)$$

式中: $y(t)$ 为激光器的输出光功率; $x(t)$ 为输入电流。

用幂级数来近似激光二极管的传输特性是一种简单的描述方式,但它忽略了传输特性随频率变化的因素。尤其是在文中副载波的工作频段上,所以可用公式(5)作为描述激光器输入—输出关系的映射函数的近似数学表达式。在通过不同频率点上实际测试与分析后确定了映射函数,同时也证明了

在文中副载波频段上,激光器的传输特性随频率的变化很小。

值得指出的是,从激光器的静态 $I-L$ 曲线可以拟合出与公式(5)数学形式相同的关系式:

$$P(t) = b_0 + b_1 I(t) + b_2 I^2(t) + b_3 I^3(t) \quad (6)$$

公式(5)和(6)的含义是不同的。简单地说,公式(5)是激光器在中高频调制下的输入—输出关系,对于上文提到的传输特性随频率变化较小的因素是指在调制的条件下,不考虑调制频率变化的影响。公式(6)是静态工作(无调制)时的输入—输出关系。对同一激光器其动态传输特征(公式(5))与静态特征(公式(6))系数上存在的较大差异是由于在多项式拟合时所采用的数据范围不同引起的。由于动态调制信号本身是较小的,在拟合映射函数关系式时所取的数据范围也较小。而静态特性曲线是在较大的数据范围内拟合得出的。

2 半导体激光器的线性化技术

假设激光器输出光功率与驱动电流的关系为:

$$P_o = a_0 + a_1 I + a_2 I^2 + a_3 I^3 \quad (7)$$

假设预失真器产生的预失真信号为:

$$I' = b_2 I^2 + b_3 I^3 \quad (8)$$

预失真器的基本原理为:当信号电压增加的过程中,激光器前端的预失真模型使经过激光器的电流更快地增加,同时抵消掉激光器在电流增大时,光功率增长的幅度比电流增长的幅度小的那部分非线性失真。通过预失真模型和激光器的共同作用后,输出光功率与输入电流之间保持线性变化关系。不但减少了谐波的干扰,而且满足了信噪比的需求。

原信号通过耦合器将驱动信号分为 3 路,如图 1 所示。一路为主通道 αI (处理基波成分),另两路为副通道(处理二、三阶失真成分),并且假定两路副通道的增益相同,预失真器就可看作副通道产生的信号。主通道通过时延直接进入合路器,副通道通过衰减器、反相

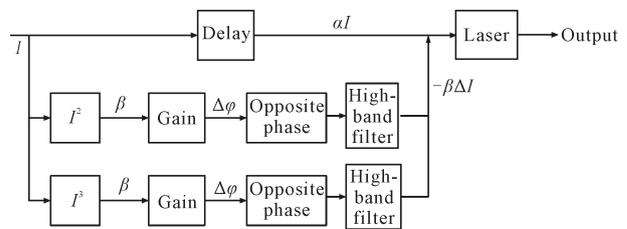


图 1 $I-L$ 特性预失真原理图

Fig.1 Principle diagram of $I-L$ features predistortion

器和滤波器后由合路器输出, 此时将输出的 3 路合成信号通过激光器, 此时激光器的输出光功率变为:

$$P' = \sum_{m=1}^3 a_m (\alpha I - \beta I')^m = \sum_{m=1}^3 a_m \left(\alpha I - \beta \sum_{n=2}^3 b_n I^n \right)^m \quad (9)$$

式中: α 为主通道增益; β 为副通道增益。

将公式(9)化为幂级数展开式:

$$P' = \sum_{m=1}^3 D_m I^m \quad (10)$$

其中

$$D_1 = \alpha a_1 \quad (11)$$

$$D_2 = \alpha^2 a_2 - \beta a_1 b_2 \quad (12)$$

$$D_3 = \alpha^3 a_3 - \beta a_1 b_3 - 2\alpha \beta a_2 b_2 \quad (13)$$

由公式(11)、(13)可计算出消除二阶非线性失真的条件:

$$\beta = \frac{\alpha^2 a_2}{a_1 b_2} \quad (14)$$

消除三阶非线性失真的条件是:

$$\beta = \frac{\alpha^3 a_3}{a_1 b_3 + 2\alpha a_2 b_2} \quad (15)$$

同时消除二阶与三阶非线性失真, 则满足:

$$\alpha = \frac{a_1 a_2 b_3}{b_2 (a_1 a_3 - 2a_2^2)} \quad (16)$$

3 实验

3.1 实验平台

实验测量系统如图 2 所示, 实验系统由信号发生器、半导体激光器、光电探测器、误差控制模块及数据采集系统组成。此外, 实验中还用到示波器和电脑等辅助设备。发送端光源选用的是美国 Newport 公司生产的 LQx/RLx Series 系列型号为 LQA850-120E 的模拟激光器, 中心波长 850 nm, 模拟调制带宽最大为 20 MHz。光电探测器采用 Thorlabs 公司生产的型号为 PDA10A-EC 的固定增益硅探测器, 波长范围为 2001 100 nm, 波长为 850 nm 时的探测灵敏度 0.35 A/W, 增益 10 kV/A。数据采集系统选用北京阿尔泰科技发展有限公司生产的 PCI8002A 同步高速数据采集卡, 用以观测和采集实时波形。其中的误差控制模块的原理是首先通过比较输入信号经过激光器前后的误差, 然后计算出 $I-L$ 预失真补偿中二阶和三阶失真通道的系数, 最终产生出补偿信号叠加到原信号上, 使得信号经过激光器后的线性度得到改善。

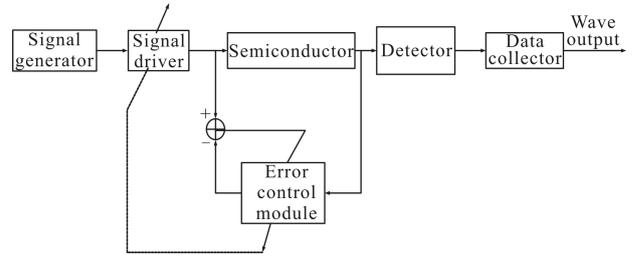


图 2 实验系统原理图

Fig.2 Principle diagram of experimental system

3.2 特性曲线拟合

对 LQA850-120E 半导体激光二极管(LD)的 $L-V$ 特性测试, 部分数据如表 1 所示。

表 1 $L-V$ 特性测试值

Tab.1 $L-V$ characteristics test values

U/V	0	0.3	0.31	0.32	0.33	0.35	0.37
P/mW	0	0	0.03	0.27	1.75	6.71	11.47
U/V	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
P/mW	15.39	38.39	61.83	85.23	109.07	133.11	135.35

这里采用最小二乘法进行数据拟合, $L-V$ 特性曲线采用三阶拟合, 并且通过三次多项式插值法进行曲线平滑性处理, 拟合后的结果如图 3 所示。其中 $L-V$ 拟合曲线三次多项式系数及阈值电压如表 2 所示。

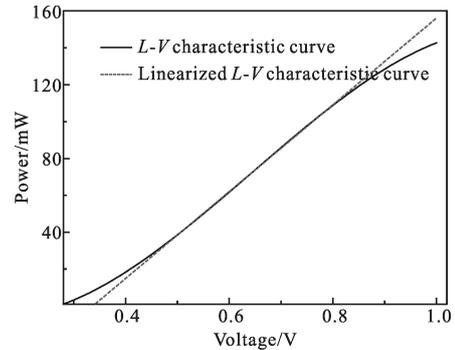


图 3 拟合后的 $L-V$ 特性曲线

Fig.3 $L-V$ characteristic curve after fitting

表 2 拟合曲线系数与阈值电压

Tab.2 Coefficient of fitting curve and threshold current

$L-V$ fitting curve of three order polynomial coefficients			
$a_0=9.297 1$	$a_1=-190.755 5$	$a_2=672.878 1$	$a_3=-342.729 8$

Threshold voltage $U_{th}=0.34 V$

3.3 实验方案验证

实验中采集到的信号幅值可以用电压量来描述。如图 4 所示, 通过信号加载到 $L-V$ 特性曲线上来模拟信号直接作用在光源上, 对光源进行直接调制的过程。

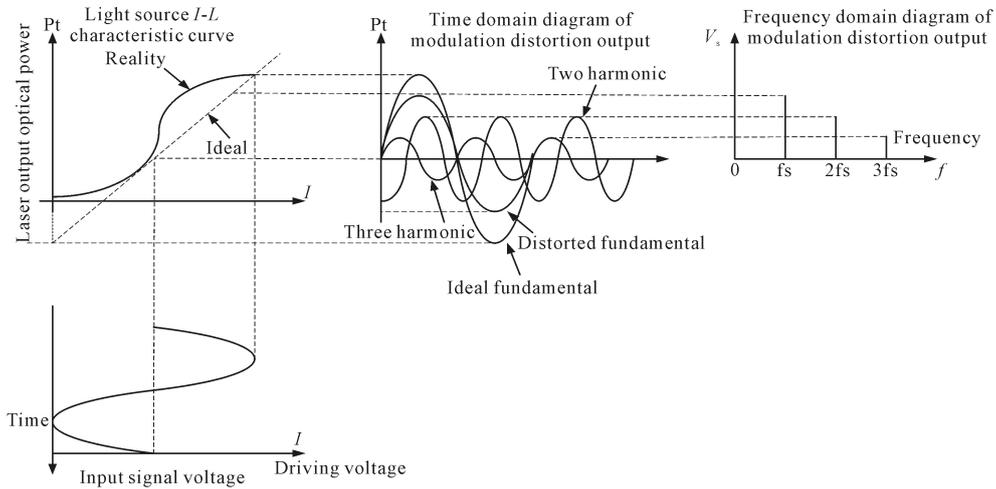


图 4 信号在激光器中的传输模型

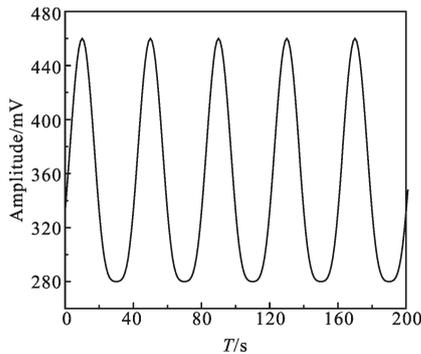
Fig.4 Signal transmission model in laser

从实验数据和拟合曲线可以看出，电压的非线性区间为 0.28~0.45 V 和 0.85~1.0 V。文中主要讨论的是阈值附近的非线性区间。为确保整个信号全部加载到非线性区间,实验中选用频率为 1 MHz,峰峰值电压 V_{p-p} 为 180 mV,偏置电压 V_{Bias} 为 370 mV 的正弦波作为测试波形。如图 5(a)所示,根据参数计

算和仿真模拟后初步得到预期的非线性信号波形。图 5(b)为相同条件下通过实验得到信号的一组测量数据。

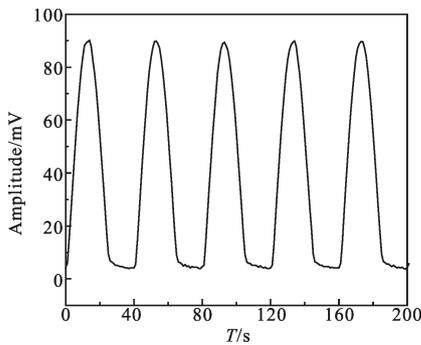
3.4 结果分析

图 6 为信号预失真前后的时域波形对比图。图中的所有曲线都是经过归一化处理后的结果，其中点虚线曲线为原始正弦信号，实色曲线为实验中所测得经过非线性失真后的信号波形，虚线为经过预失真补偿后的信号波形。从图中清楚地看到,正弦信号波形经过预失真补偿后的效果明显，时域波形畸变得到了很大程度的修复。



(a) 仿真信号

(a) Simulated signal



(b) 实测信号

(b) Measured signal

图 5 非线性失真信号

Fig.5 Nonlinear distortion signal

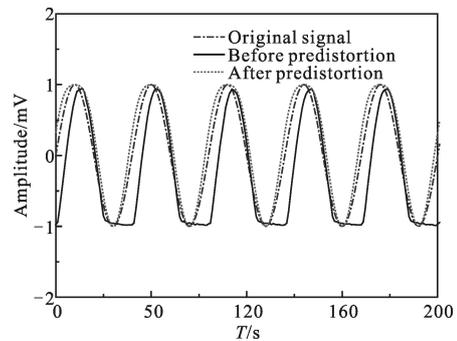


图 6 信号预失真前后时域波形图

Fig.6 Signal waveform before and after the predistortion

图 7 为信号预失真前后的频谱对比图。从图中清楚地看到：经过 LD 非线性失真后的频谱发生展宽,并且出现明显的二阶、三阶谐波分量,而经过预失真之后的频谱主要集中在中心频率处,二次谐波分量得到抑制,几乎没有三次谐波成分。二次谐波与三次谐波分量分别改善了 2.05 dB 和 5.5 2dB。

图 8 为信号预失真前后的功率谱对比图。预失真有效地抑制了带内和带外失真, 非线性补偿分

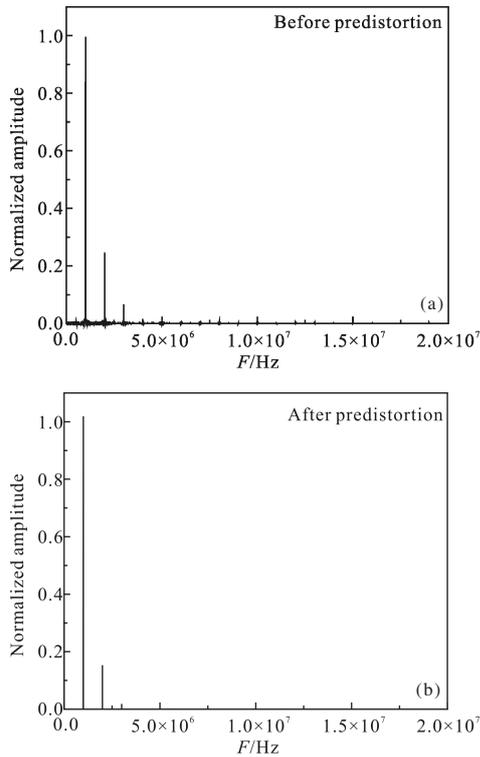


图 7 信号预失真前后频谱图

Fig.7 Spectrum before and after predistortion

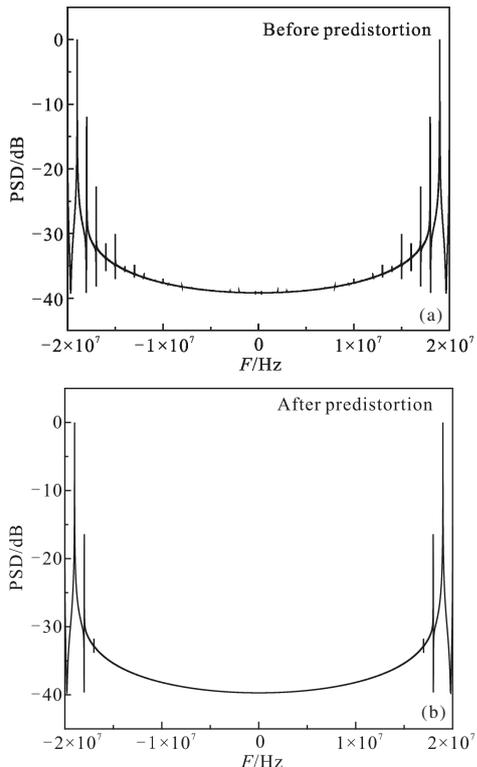


图 8 信号预失真前后功率谱图

Fig.8 Power spectrum before and after predistortion

别改善了 6.59 dB 和 0.55 dB。预失真曲线位于未经补偿的曲线下方, 这说明预失真过程付出了放大倍数降低的代价。

4 结论

文中采用静态非线性的分析方法对半导体激光器进行研究。通过对激光器的参数实际测量和建模, 并将副载波信号加载到相应区间来模拟激光器的非线性, 选择 $I-L$ 特性预失真的方法进行非线性校正。通过实验可知: 副载波信号在预失真后的时域波形、频谱及功率谱等方面都有明显改善和变化, 从而证明了抑制非线性方法的有效性。

参考文献:

- [1] Kuo C Y. Fundamental second-order nonlinear distortions in analog AM CATV transport systems based on single frequency semiconductor lasers [J]. *Lightwave Technology*, 1992, 10(2): 235-243.
- [2] Zhan Yushu, Wang He, Gao Zhihui. Theoretical and experimental study of nonlinear distortion in semiconductor laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 11: 1155-1160. (in Chinese) 詹玉书, 王鹤, 高致慧. 半导体激光器非线性失真的理论和实验研究[J]. *光学学报*, 1994, 11: 1155-1160.
- [3] Ren Xingen. Research on the harmonic distortions of large signal directly modulated laser diodes[J]. *Telecommunication Science*, 1994, 10(2): 30-34. (in Chinese) 任新根. 大信号直接调制半导体激光器的谐波非线性失真特性研究[J]. *电信科学*, 1994, 10(2): 30-34.
- [4] Wang Xinhong, Cha kaide. An analysis of the nonlinearity of DFB laser in CATV system with discrete fourier transform method [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1998, 26 (5): 12-16. (in Chinese) 王新宏, 查开德. 采用离散傅立叶变换对 CATV 系统中 DFB 激光器非线性特性的分析[J]. *电子学报*, 1998, 26(5): 12-16.
- [5] Childs R B, Byrne V A O. Predistortion linearization of directly modulated DFB lasers and external modulators for AM video transmission [C]//Tech Dig Optical Fiber Communications Conf, 1990.
- [6] Ma Fengshan, Ye Weifang. Distributed feedback laser overload operation—predistortion method to improve the cost performance[J]. *Cable TV Technology*, 2000, 8: 69-72. 马凤山, 叶维芳. 分布反馈激光器超载运行——预失真法

- 提高了性价比[J]. 有线电视技术, 2000, 8: 69-72.
- [7] Tucker R S, Pope D J. Large signal circuit model for simulation of injection-laser modulation dynamics[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1983, 19: 1179-1183.
- [8] Tian Xuenong, Wang Zhigong. Nonlinear model of semiconductor laser diodes based on volterra series analysis[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2010, 40(2): 253-257. (in Chinese)
田学农, 王志功. 基于 Volterra 级数分析的半导体激光器非线性模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(2): 253-257.
- [9] Jiao Licheng. Theory And Application of Nonlinea Transfer Function[M]. Xai'an: Xidian University, 1992: 107-109. (in Chinese)
焦李成. 非线性传输函数理论与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1992: 107-109.
- [10] Darcie T E, Tucker R S, Sullivan G J. Intermodulation and harmonic distortion in InGaAsP lasers [J]. *IEEE Lett*, 1985, 21(16): 665-666.
- [11] Takemoto A, Watanabe H, Nakajima Y, et al. Distributed feedback laser diode and module for CATV systems [J]. *IEEE J Selected Areas in Communications*, 1990, 8(7): 1359-1365.