

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0124-04

利用双区分布反馈布拉格激光器进行全光时钟恢复

苏洋, 闻传花, 李玉权

(解放军理工大学通信工程学院光纤通信实验室, 江苏南京 210007)

摘要 全光再生技术是未来全光通信网的核心, 其中的关键技术就是全光时钟恢复。建立了基于双区分布反馈布拉格(DFB)激光器的自脉动进行相干时钟恢复的模型, 利用载流子速率方程和耦合波方程分析了其工作机理, 并用数值模拟方法对时钟恢复过程中的锁定和失步特性以及相位稳定性问题进行了分析。结果表明, 时钟锁定时间在 1 ns 左右, 而失步时间为次纳秒量级; 比特率失谐大小、比特率大小以及注入功率大小均影响相位的稳定性。分析表明, 通过调节激光器的外部条件和参量, 可以有效增强自脉动的稳定性, 为全光信号再生设备的研制提供优化设计。

关键词 光通信; 时钟恢复; 自脉动; 双区分布反馈布拉格激光器

中图分类号 TN929.11; TN256 **文献标识码** A

Dynamics of All-Optical Clock Recovery Using Two-Section Distributed Feedback Bragg Lasers

SU Yang, WEN Chuan-hua, LI Yu-quan

(Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract All-optical regeneration is the core technology in all-optical communication in the future in which the key technique is the all-optical clock recovery. Based on the carrier rate equation and the coupled wave equations the mechanism of all-optical coherent clock recovery using two-section distributed feedback Bragg (DFB) lasers' self-pulsation is studied. Numerically simulation method is used to analyze the lockup, walk-off and phase stability in the clock-recovery process. The results indicate that the fast lockup and walk-off of the clock-recovery process are about 1 ns and on the order of subnanosecond respectively. The bit-rate detuning, bit-rate and the injection power all have influence on the phase stability. The analysis shows that the stability of self-pulsation can be enhanced by optimizing the parameters and external conditions and supply optimized designs for the research and facture of all-optical signal regeneration devices.

Key words optical communication; clock recovery; self-pulsation; two-section distributed feedback Bragg laser

1 引言

在大容量超高速光纤通信线路中, 光纤和系统所存在的色散、损耗及非线性效应, 造成了光信号波形失真和幅度衰减。为恢复损伤信号, 需设置光中继器对光信号再生。传统的光中继器采用光-电-光的方式, 由于“电子瓶颈”制约着光信号的传输速率, 使系统结构复杂, 难以集成化, 并且无法满足对通信数据比特率和数据格式透明性的要求。全光再生技术可克服传统技术中的弊病, 是未来全光通信网中

的核心技术。实现全光再生技术的关键和难点是全光时钟提取和恢复。

时钟恢复是全光再生技术中最难实现的模块, 目前尚处于研究探索阶段, 主要有光锁相环技术、光纤锁模激光器技术和半导体激光器自脉动技术。光锁相环技术成本高、功耗大且难以集成化。而自脉动现象的发现为全光时钟提取技术开辟了一条新的有效途径, 引起了人们强烈的兴趣。

基金项目: 国家自然科学基金(60472007)资助课题

作者简介: 苏洋(1980-), 女, 江苏人, 解放军理工大学通信工程学院博士研究生, 主要从事光通信方面的研究。

E-mail: qieziyangyang@163.com

2 原理和数值模型

自脉动现象是指在注入直流电流时,激光器输出光有持续的脉动。它是由于激光器腔内载流子与光子的相互作用产生载流子的烧孔和光场收缩,从而引起本征自脉动。自脉动产生的机理在不同激光器结构和不同外部条件下是有差异的,并且产生的结果也不相同。法布里-珀罗(F-P)腔激光器的自脉动产生条件为增益区载流子寿命与饱和吸收区载流子寿命达到较高的比值,这在技术上较难实现,而且其自脉动频率比较低^[1]。近年来,有研究发现分布反馈布拉格(DFB)激光器自脉动产生的机理与法布里-珀罗腔激光器不同,并且产生的自脉动有更好的特性。

利用双区分布反馈布拉格激光器进行相干时钟恢复的特点是注入数据的载波波长与双区分布反馈布拉格激光器的波长相近。相干时钟恢复的机理如下^[2]:由于时钟成分的存在,注入数据的光谱中包含边带成分,其中一个边带与前区分布反馈布拉格的激光模式联合,而光载波与后区分布反馈布拉格的

激光模式联合。在双区分布反馈布拉格激光器中都发生光注入锁定,而两个光注入锁定模式的差拍产生了恢复时钟信号^[3]。双区分布反馈布拉格激光器模型如图1所示^[4]。

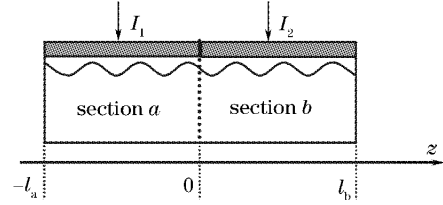


图1 双区分布反馈布拉格激光器模型

Fig.1 Model of two-section distributed feedback Bragg laser

采用大信号时域有限差分法研究双区分布反馈布拉格激光器的动态特性^[5]。双区分布反馈布拉格激光器有两个独立的注入电流。假设 a 区(前区)范围从 $z = -l_a$ 到 $z = 0$, 而 b 区(后区)范围从 $z = 0$ 到 $z = l_b$ 。激光器的时空动态特性由载流子密度 N_s 以及电场特性 $E(z, t)$ 来确定。在腔中光场分布为

$$E(z, t) = F_s(z, t) \exp[-i(\omega t - \beta z)] + B_s(z, t) \exp[-i(\omega t + \beta z)], \quad (1)$$

其中 F_s 和 B_s 分别代表前向与后向运动的光波振幅,它们满足单模近似下的耦合波方程

$$\partial F_s / \partial z + v_s^{-1} \partial F_s / \partial t = 1/2 [G_s(z, t) - \Gamma_s] F_s + i\kappa_s B_s, \quad (2)$$

$$\partial B_s / \partial z - v_s^{-1} \partial B_s / \partial t = -1/2 [G_s(z, t) - \Gamma_s] B_s - i\kappa_s F_s, \quad (3)$$

而载流子速率方程为

$$\partial N_s / \partial t = I_s / qV_s - N_s / \tau_s - [g_m(N_s - N_{0s}) / (1 + \epsilon_s P_s)] v_s P_s, \quad (4)$$

其中 s 下标代表 a 区或 b 区, Γ_s 为波长失谐量, κ_s 是分布反馈布拉格区的光栅耦合系数, $G_s(z, t)$ 为增益系数, 与布拉格失谐 $\Delta\beta = 2\pi n_{\text{eff},s} / \lambda - \pi / \Lambda_s + mI_s$ 有关, 其中 Λ_s 为波纹周期。给出边界条件

$$F_a(-l_a, t) \exp(-i\beta_a l_a) = r_1 B_a(-l_a, t) \exp(i\beta_a l_1) + t_1 S_{\text{inj}}(t), \quad (5)$$

$$B_a(l_b, t) \exp(-i\beta_b l_b) = r_2 F_a(l_b, t) \exp(i\beta_b l_b), \quad (6)$$

其中 r_1 和 r_2 分别为电场在左端面和右端面的反射系数, t_1 是左端面的传输系数。从左段注入的数据为

$$S_{\text{inj}}(t) = A_{\text{inj}} d(t) [\exp(-i\Omega_1 t) + \exp(-i\Omega_2 t)], \quad (7)$$

其中 A_{inj} 为注入场的幅度, $d(t) = 1$ 或 0 , 是注入数据值, Ω_1 和 Ω_2 为注入数据中所含时钟成分的角频率(从布拉格条件中所测)。输入数据的比特率 B_{inj} 为 $|\Omega_2 - \Omega_1| / (2\pi)$ 。利用有限差分数值法, 可以得到在时域大信号情况下, 光功率和载流子浓度随时间变化出现张弛振荡。

3 锁定和失步的动态特性

自脉动与外部信号的同步并不是瞬时发生的。在通信系统中, 时钟恢复的重要参量是锁定时间和失步时间。即加上注入信号(注入信号中断)到同步

(失步)之间的时间间隔。可以通过改变双区分布反馈布拉格激光器中的注入电流 I_1, I_2 以及失谐参量 $\Delta\beta_a$ 和 $\Delta\beta_b$ 来改变本征自脉动频率, 使它接近注入数据的比特率。另外要适当选择注入信号的光载波频率, 使双区分布反馈布拉格激光器的两个激光模式锁定到注入数据信号的时钟成分上。注入比(注入信号功率与自由运行激光器的输出功率之比)的范围在 -30 dB 到 -46 dB 之间。为分析相干时钟恢复的动态特性, 文献[2]利用希尔伯特(Hilbert)变换对本征自脉动和恢复时钟的瞬时相位和频率进行了计算。锁定和失步时间动态特性的仿真结果如

图 2 所示^[5]。

图 2(a)描述了在本征自脉动频率 23.9 GHz 附近的不同比特率信号注入条件下,自脉动信号锁定注入信号的过程。注入比为 -41.16 dB。图中可以看出对于四种注入情况,锁定时间在 2 ns 左右,而失

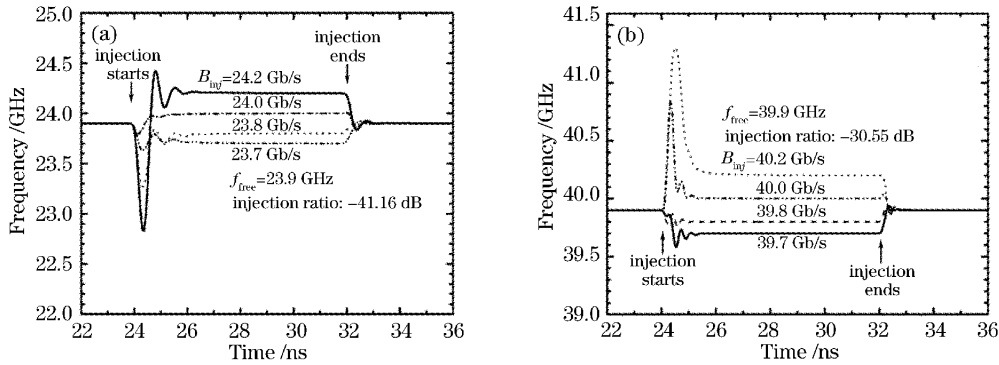


图 2 锁定和失步过程的动态特性

Fig. 2 Temporal dynamics of lockup and walk-off progress

仿真和实验都显示出了相干时钟恢复的锁定时间在纳秒范围之内。这种快速锁定的特性是时钟恢复过程中所希望的。并且通过增加注入功率可以使锁定时间小于 1 ns。

另一方面,失步时间主要取决于自由运行双区分布反馈布拉格激光器的动态性能。失步时间在次纳秒量级,这个特性对时钟恢复是不利的。如果注入信号中有一长串的 0 比特,那么就会逐渐失去同步。但是当比特率失谐为零时,失相时间主要由本征自脉动信号的相干时间决定,约为 20 ns^[5]。有实验显示^[6],输入数据为 40 Gb/s, 占空比为 25% 时,该方案可支持 400 个连“0”比特。

4 相位稳定性

为了研究恢复时钟的相位特性,将恢复的时钟信号与模式发生器中的原始时钟信号在谐波混频器中混合。经低通滤波器输出的信号即对应着两个时钟的相位差。当注入信号比特率为 24 Gb/s,本征自脉动频率 $f_{\text{free}} = 23.9$ GHz 时从示波器中观察到,输出信号在 100 MHz 处开始振荡^[5],这正为失谐频率 $\Delta f = B_{\text{inj}} - f_{\text{free}}$ 。

为了研究恢复时钟的相位稳定性,在仿真中为双区分布反馈布拉格激光器注入伪随机比特序列数据。对不同比特率和比特率失谐情况下的相位进行了仿真^[5]。从中可以看出:在比特率失谐非零,当输入数据的占空比较低时,相位波动的幅度随之增加;

步时间小于 1 ns。改变双区激光器中的静态失谐参量和偏置电流,使本征自脉动频率变为 39.9 GHz,锁定和失步过程如图 2(b)所示。从图中可以看到,锁定时间约为 1 ns,而失步时间为次纳秒量级。

比特率失谐越小,恢复时钟的相位越稳定;对于相同的比特率失谐,比特率越高,恢复时钟的相位越稳定。

注入数据的波长变化和功率变化对相位也有影响。在固定的比特率下,注入率为 -34.99 dB (-30.55 dB),比特率失谐为 -100 Mb/s 时,光载波每变化 216 MHz,恢复时钟的相位变化约为 0.17 rad(0.08 rad)。而当比特率失谐为零时,相位变化约为 0.15 rad(0.07 rad)。可见注入率越高,相位变化越小;比特率失谐越小,相位变化越小。假设能接受 5% 的时钟相位误差,那么在零比特率失谐、注入率为 -30.55 dB 的情况下,可以接受的光载波频率变化为 -730 MHz(在 1550 nm 上变化 0.0058 nm)。

对于注入功率变化与相位变化的关系,如果光载波失谐为 -115.2 MHz,当注入率从 -40 dB 变化到 -30 dB 时,比特率失谐分别为 -100 Mb/s, 0 Mb/s, 对应的恢复时钟相位的变化分别为 0.33 rad 和 0.07 rad。假设光载波失谐为 -115.2 MHz,在注入率分别为 -34.99 dB 和 -30.55 dB 情况下,比特率每发生 100 Mb/s 的变化,时钟的相位变化分别为 0.21 rad 和 0.12 rad。所以对于 5% 的相位变化,当注入率为 -30.55 dB 时,可接受的比特率变化为 260 Mb/s。

5 结 论

通过对双区分布反馈布拉格激光器件自脉动产

生机制及特性的理论分析,经过数值模拟计算表明,适当地设置分布反馈布拉格激光器件的一些参量和控制外部条件,可以有效地提高自脉动的频率,增加自脉动的稳定性,为全光信号再生设备的研制提供优化的设计。利用多区分布反馈布拉格激光器件自脉动进行时钟提取技术具有脉动频率高、器件体积小、可大范围调谐以及对偏振不敏感等优点。但全光再生系统同电子或光电混合再生系统相比,离实用化尚有较大的距离,有待于理论上更深入的研究和技术上的创新。

参 考 文 献

- 1 Lun Xiujun, Huang Yongqing, Ren Xiaomin. Study on self-pulsation of DFB laser devices [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 290~293
伦秀君,黄永清,任晓敏. DFB 激光器件自脉动的研究 [J]. 光子学报, 2003, **32**(3): 290~293
- 2 Antonio Vizzino, Mariangela Gioannini, Ivo Montrosset. Dynamic simulation of clock recovery with self-pulsating three-section distributed-feedback lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(12): 1580~1586
- 3 Weiming Mao, Yuhua Li, Mohammed Al-Mumin *et al.*. All-optical clock recovery from RZ-format data by using a two-section gain-coupled DFB laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(9): 1705~1714
- 4 Guillaume Pham, Guang-Hua Duan. Self-pulsation in two-section DFB semiconductor lasers and its synchronization to an external signal [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(6): 1000~1008
- 5 Inwoong Kim, Cheolhwan Kim, Patrick L. LiKamWa *et al.*. Dynamics of all-optical clock recovery using two-section index- and gain-coupled DFB lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(4): 1704~1712
- 6 Yu Yinghui, Yu Jinlong, Hua Ying *et al.*. Clock recovery in the 3R regeneration [J]. *Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(11): 1202~1205
于映辉,于晋龙,华颖等. 3R 再生中的时钟提取技术[J]. 光子学报, 2002, **13**(11): 1202~1205