

基于光注入 Fabry-Perot 半导体激光器实现同步 全光分路时钟提取与波长转换^{*}

吕玉祥[†] 杨 星 孙 帅

(太原理工大学理学院物理系,太原 030024)

(2008 年 8 月 3 日收到,2008 年 12 月 15 日收到修改稿)

提出了一种利用 Fabry-Pero(FP)半导体激光器同步提取波长转换的分路光时钟的新方法,并对该方法进行了数值模拟和实验验证.光注入半导体激光器会产生非线性单周期振荡特性,利用交叉增益调制效应及对单周期振荡的微波锁频效应,可从光时分复用信号中提取出波长转换的分路光时钟.采用一个 FP 半导体激光器作为全光分路时钟提取及波长转换器,数值模拟实现了从波长为 1555 nm、速率为 2×20 Gb/s 的光时分复用信号中提取出波长转换为 1550 nm、重复频率为 20 GHz 的分路光时钟,实验完成了从波长为 1550.24 nm、重复频率为 12.36 GHz 光脉冲信号中提取出相位噪声为 -105 dBc/Hz 的波长为 1545.91 nm、重复频率 6.18 GHz 的分频光时钟.此外还详细研究了注入光功率、波长失谐、FP 激光器偏置电流及纵模选择对光时钟提取的影响,实验结果和数值模拟结果符合.该方法在光时分复用混合波分复用通信系统中实现全光解复用及波长路由有着重要的应用价值.

关键词:波长转换,时钟提取,光注入,非线性动力学

PACC:4262,4255P,4230Q

1. 引 言

光时分复用(OTDM)结合波分复用(WDM)技术是未来光通信网络提高传输速率和传输容量的最优方案之一.全光分路时钟信号提取是光时分复用系统中至关重要的技术之一.所谓全光分路时钟提取,是指用全光学方法从 OTDM 光脉冲信号中提取出低时间抖动的同步分路时钟信号,以便把它分配到 OTDM 通信系统的解复用器、路由选择器、信道选择器和接收器等.目前已有不少研究者利用不同的方法实现了分路时钟信号提取,诸如利用基于半导体光放大器(SOA)的非线性环形镜^[1]、光栅滤波开关^[2]、注入锁模^[3]的方法,利用半导体激光器的倍周期效应^[4]、光电反馈注入锁定 FP 激光器^[5]等方法.在波分复用光网络中,全光波长转换是一项非常重要的技术^[6].迄今为止,人们已发展了众多实现全光波长转换的方法,包括交叉增益调制(XGM)^[7]、交叉相位调制(XPM)^[8]、四波混频(FWM)^[9]、非线性光环

形镜(NOLM)^[10]等技术,目前此方面的研究目标主要是发展结构简单、成本低廉的波长转换器^[11,12].文献[11]和[12]中利用一个 Fabry-Pero(FP)激光器实现了全光波长转换.传统的全光分路时钟提取和波长转换都是在独立的 OTDM 和 WDM 系统中单独实现的,对于光时分复用混合波分复用系统,有研究者开展了全光解复用及波长路由的研究,实现了从 OTDM 信号到单路 WDM 信号的解复用及波长转换^[13,14].在文献[13]和[14]中所利用的不同波长的分路光时钟均是使用和 OTDM 驱动信号同步的微波源调制不同波长的激光器产生的,但是在未来光时分复用混合波分复用通信系统中,更具有实际意义的是直接从 OTDM 信号中提取进行了波长转换的分路光时钟信号,从而利用该光时钟信号进行全光解复用及波长路由,目前尚未见有文献报道可同步实现波长转换的分路光时钟提取技术.这里我们提出了一种仅利用一个 FP 半导体激光器实现同步全光分路时钟提取与波长转换的新方法,并对该方法进行了数值分析和实验验证.

^{*} 国家自然科学基金(批准号:60577019)资助的课题.

[†] E-mail: tyut.lyx@gmail.com

2. 理论分析及数值模拟

当脉冲信号光和连续探测光同时注入半导体激光器时,激光器腔内的载流子受到注入信号光的调制,从而连续探测光的增益受到调制,输出反相的光脉冲,此即所谓的交叉增益调制效应(XGM).利用交叉增益调制效应可将信号光携带的信息传递到探测光上,实现信号传送的波长转换.

外光注入半导体激光器后会产生各种非线性动力学特性^[15],诸如单周期振荡、倍周期振荡、四倍周期振荡、低频起伏以及混沌等现象.已有报道利用倍周期振荡特性的锁频效应实现时钟分频^[16].相较于其他非线性动力学现象,单周期振荡可在较大的注入功率和频率失谐范围内获得,极易产生和控制^[17,18].

因此可利用光注入半导体激光器后产生的非线性单周期振荡特性的锁频效应及交叉增益调制效应,将 OTDM 信号光和一束连续探测光注入一个 FP 半导体激光器而实现同步全光分路时钟提取和波长转换.该方法的理论模型如图 1 所示. OTDM 信号光的速率为 2×20 Gb/s,波长为 λ_s .连续探测光的波长为 λ_p ,两束光注入 FP 半导体激光器后,通过适当调节注入光功率、波长失谐以及 FP 激光器的偏置电流,可提取出波长转换为 λ_p 、频率为 20 GHz 的分路光时钟.

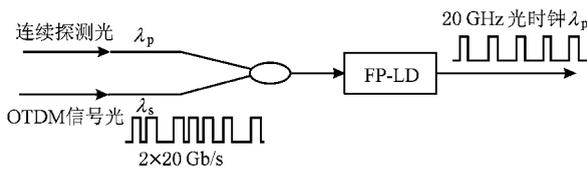


图 1 全光分路时钟提取和波长转换的理论模型

OTDM 信号和连续探测光注入 FP 半导体激光器实现同步全光分路时钟提取和波长转换的速率方程可描述如下^[19,20]:

$$\begin{aligned} \frac{dN(t)}{dt} &= \frac{K(t)}{eV} - \frac{N(t)}{\tau_n} - g_1(N(t) - N_0) \\ &\times \frac{S_1(t)}{1 + \epsilon[S_1(t) + S_2(t)]} - g_2(N(t) - N_0) \\ &\times \frac{S_2(t)}{1 + \epsilon[S_1(t) + S_2(t)]}, \quad (1) \\ \frac{dS_1(t)}{dt} &= \frac{\beta\Gamma N(t)}{\tau_n} + \Gamma g_1(N(t) - N_0) \\ &\times \frac{S_1(t)}{1 + \epsilon[S_1(t) + S_2(t)]} - \frac{S_1(t)}{\tau_p} \\ &+ 2 \frac{k_{inj1}}{\tau_{in}} \sqrt{S_1(t)S_{m1}(t)} \cos \xi_1(t), \quad (2) \\ \frac{dS_2(t)}{dt} &= \frac{\beta\Gamma N(t)}{\tau_n} + \Gamma g_2(N(t) - N_0) \\ &\times \frac{S_2(t)}{1 + \epsilon[S_1(t) + S_2(t)]} - \frac{S_2(t)}{\tau_p} \\ &+ 2 \frac{k_{inj2}}{\tau_{in}} \sqrt{S_2(t)S_{m2}(t)} \cos \xi_2(t), \quad (3) \\ \frac{d\phi_1(t)}{dt} &= \frac{1}{2} \alpha \left[\frac{\Gamma g_1(N(t) - N_0)}{1 + \epsilon[S_1(t) + S_2(t)]} - \frac{1}{\tau_p} \right] \\ &- \frac{k_{inj1}}{\tau_{in}} \sqrt{\frac{S_{m1}(t)}{S_1(t)}} \sin \xi_1(t), \quad (4) \\ \frac{d\phi_2(t)}{dt} &= \frac{1}{2} \alpha \left[\frac{\Gamma g_2(N(t) - N_0)}{1 + \epsilon[S_1(t) + S_2(t)]} - \frac{1}{\tau_p} \right] \\ &- \frac{k_{inj2}}{\tau_{in}} \sqrt{\frac{S_{m2}(t)}{S_2(t)}} \sin \xi_2(t), \quad (5) \end{aligned}$$

式中 N 、 S 和 ϕ 分别为半导体激光器的载流子密度、光子密度和相位, S_m 为主激光器的光子密度, $k_{inj} = (1 - R) \sqrt{\frac{r_p}{R}}$ 是衡量注入光强弱的一个参量, 式中 R 为从激光器输出端面的光强反射率, r_p 为注入从激光器的光功率和主激光器发出的光功率之比, $\xi(t) = \phi(t) + (\omega_s - \omega_m)t$, ω_m 和 ω_s 分别为主激光器和从激光器纵模的角频率. 各个符号的物理意义和参量见表(1).

数值模拟中,连续探测光的波长为 1550 nm, OTDM 光信号是一列波长为 1555 nm,速率为 2×20 Gb/s 的 RZ 伪随机比特流(PRBS),如图 2(a)所示.图 2(b)为所提取的波长为 1550 nm、重复频率为 20 GHz 的分路光时钟的时序图,其频谱如图 2(c)所示.结果表明利用光注入半导体激光器后产生的非线性单周期振荡特性的锁频效应及交叉增益调制效应,可直接从 OTDM 信号光中提取出转换了波长的分路光时钟.

此外,我们还分别研究了注入光功率大小、波长失谐量及 FP 半导体激光器的偏置电流水平对提取波长转换分路光时钟的影响.图 2(a)所示为当信号光的注入系数保持为 $K_{inj} = 2.5$ 时,探测光不同的注入功率对提取光时钟的影响,可以看出此时探测光存在一最佳注入系数可使提取的光时钟的峰值功率达到极大值.类似地,当探测光的注入系数保持为 $K_{inj} = 2.89$ 时,信号光亦存在一最佳注入系数,此时

可获得最大峰值功率的光时钟输出,如图 3(b)所示.

表 1 各符号的物理意义和参量

| 符号 | 物理量 | 参量 |
|------------|---------|-----------------------------------|
| e | 电子电量 | $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ |
| V | 有源区体积 | $1.5 \times 10^{-16} \text{ m}^3$ |
| τ_n | 载流子寿命 | 2 ns |
| τ_p | 光子寿命 | 2 ps |
| Γ | 限制因子 | 0.4 |
| N_0 | 透明载流子密度 | $3 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ |
| ϵ | 增益饱和系数 | $3 \times 10^{-23} \text{ m}^3$ |
| α | 线宽增强因子 | 4.5 |
| g_1 | 微分增益系数 | 2×10^{-12} |
| g_2 | 微分增益系数 | 1.88×10^{-12} |
| β | 自发辐射因子 | 1×10^{-5} |
| R | 端面强度反射率 | 0.3 |

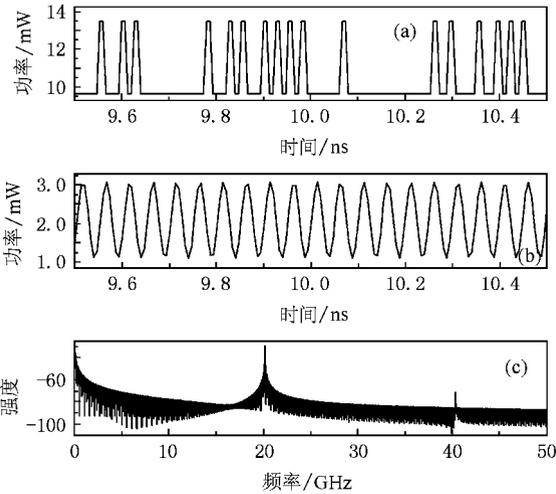


图 2 (a) $2 \times 20 \text{ Gb/s}$ 的 OTDM 信号光的时序图 (b) 频率为 20 GHz 分路光时钟的时序图 (c) 频率为 20 GHz 分路光时钟的频谱图

数值模拟中发现,并非注入光波长等于被锁定纵模波长时可获得最佳的光时钟输出,而是当注入光波长略大于被锁定纵模的波长时提取的光时钟可得到最大的峰值功率输出,这一结果我们认为应是注入光导致被锁定纵模波长红移所引起的.如图 4 所示,在一定注入光功率下,当探测光与被锁定纵模频率失谐量约为 0.7 GHz 时,所提取的光时钟的输出峰值功率最大.

半导体激光器的偏置驱动电流越大,各纵模获得的增益越大,但是驱动电流过大又会造成注入锁

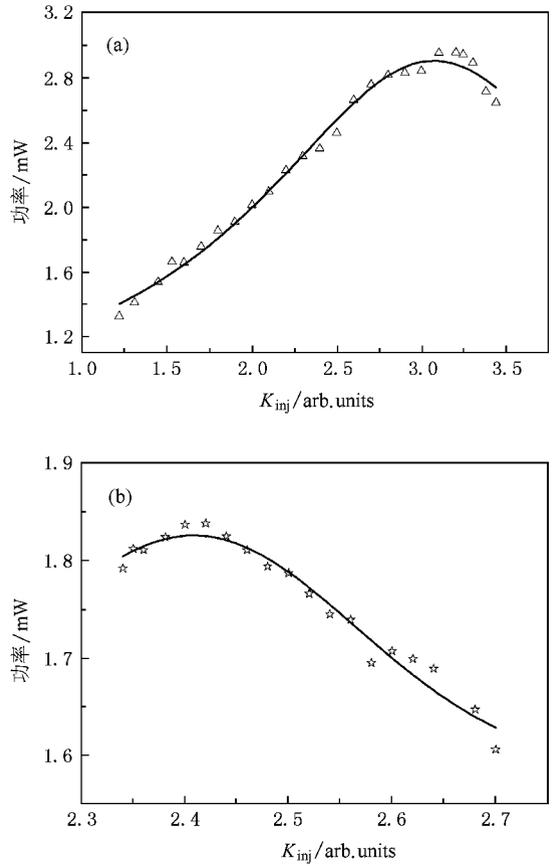


图 3 (a) 探测光注入功率对提取光时钟的影响 (b) 信号光注入平均功率对提取光时钟的影响

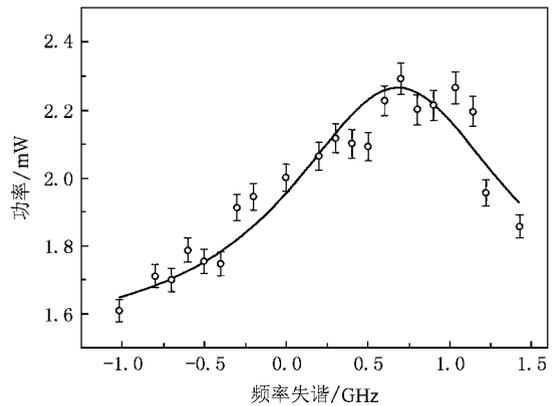


图 4 探测光与 FP 激光器被其锁定纵模的频率失谐对提取光时钟的影响

定不完全,形成多纵模无规输出,而且过低或过高的驱动电流还会破坏非线性单周期振荡现象的产生,导致分路时钟提取失败,因此在一定注入光功率下,被注入的 FP 激光器必然存在一个合适的偏置电流范围,使得能够同时实现波长转换及分路时钟提取.

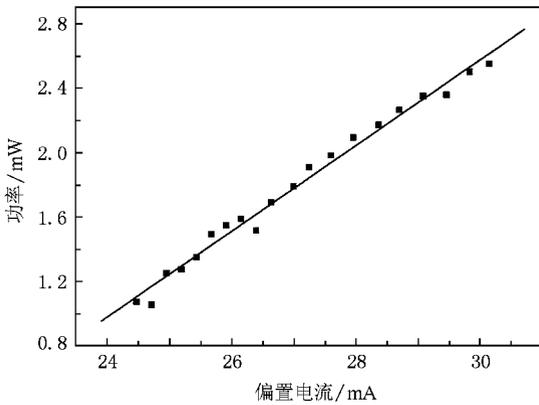


图 5 FP 半导体激光器的偏置电流对提取光时钟的影响

图 5 所示为 FP 半导体激光器的偏置电流对提取光时钟的影响,此时探测光和信号光的注入系数分别为 2.89 和 3.2,可以看出,此时 FP 激光器的偏置电流在 24.5 mA 至 30.2 mA ($1.88I_{th}$ — $2.32I_{th}$) 的范围内均可有效地提取光时钟,而且随着偏置电流的增大,光时钟的输出峰值功率不断增大。

3. 实验装置和结果

实验装置如图 6 所示.利用信号发生器(Agilent E8257D)产生的射频信号调制一个集成电吸收调制器的分布反馈半导体激光器(EAM-DFB LD),产生重复频率最高可达 20 GHz 的光脉冲信号.输出的光脉冲经掺铒光纤放大器(EDFA)后,通过一光隔离器

(OI)和偏振控制器(PC)后经过一光环形器(OC)注入 FP 半导体激光器(FP-LD),偏振控制器用来控制注入光模式的耦合效率,注入光功率由一个可调节光衰减器来控制.探测光由一个直流驱动的 DFB 半导体激光器产生,输出的连续探测光经一个光耦合器后与光脉冲信号一起注入到 FP 半导体激光器.实验中所使用的三个半导体激光器均由精密的温度控制器(TC)控制工作温度,并可通过调节工作温度来控制激光器的输出波长.FP 半导体激光器的输出光信号经过 EDFA 放大后注入到一个可调谐光栅滤波器.用光谱分析仪(Agilent 86140B)来观察输出信号的光谱.光信号经一个带宽 50 GHz 的超快光电探测器(u2t XPDV2020)后输入宽带取样示波器(Agilent 86100B)和频谱分析仪(Agilent E4407B)进行波形和频谱测量.

FP 半导体激光器无外光注入自由振荡时的输出光谱如图 7(a)所示.为方便描述,我们将输出纵模的中心模式定义为“0 模”,短波长方向的模式依次定义为“-1 模”、“-2 模”、“-3 模”以及“-4 模”等,依此类推,长波长方向的模式分别定义为“+1 模”、“+2 模”、“+3 模”和“+4 模”等.当连续探测光和脉冲信号光注入 FP 激光器后,可将 FP 激光器的两个纵模锁定,其他模式受到抑制而熄灭.实验中光脉冲信号将“0 模”锁定在 1550.24 nm,连续探测光将“-4 模”锁定在 1545.91 nm.信号光脉冲和连续探测光注入 FP-LD 后,利用交叉增益调制效应

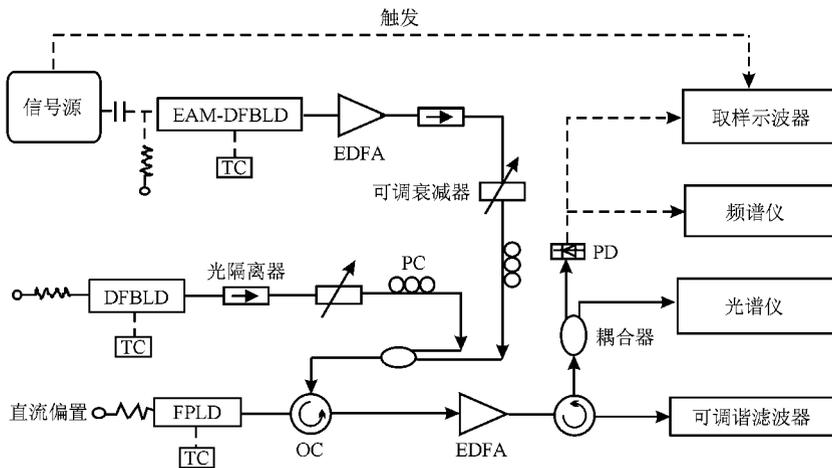


图 6 基于光注入 FP 半导体激光器实现同步时钟提取和波长转换的实验装置示意图.图中实线为光路,虚线为电路.EAM-DFB LD:集成电吸收调制器分布反馈半导体激光器;PD:光电探测器;TC:温度控制器;EDFA:掺铒光纤放大器;PC:偏振控制器;FP-LD:FP 半导体激光器;OC:光环形器

(XGM) 和非线性单周期振荡的锁频效应, 可同时实现波长转换与分频时钟的提取. 通过调节光脉冲信号和探测光的注入功率、探测光与 FP 半导体激光器被锁定模式的波长失谐量、FP 半导体激光器的直流偏置以及注入两束光的偏振状态来控制同步全光时钟提取与波长转换的产生. 图 7 (b) 所示为提取的信号光波长转换为探测光波长后的分路时钟的输出光谱, “0 模” 经过可调谐光栅滤波器后被滤除.

图 8 (a) 所示为注入 FP-LD 的原始信号光脉冲的波形, 重复频率为 12.36 GHz, 图 8 (c) 为其频谱图. 所提取的波长转换后的二分频的分路光时钟的波形如图 8 (b) 所示, 重复频率为 6.18 GHz, 成为注入信号光脉冲重复频率的一半, 图 8 (d) 为其频谱图, 此光时钟的相位噪声为 -105 dBc/Hz.

图 9 显示了注入光功率对提取的波长转换后光时钟的幅度的影响. 图 9 (a) 所示为转换为探测光波长的光时钟的幅度随连续探测光注入功率的变化曲线, 此时信号光脉冲的平均注入光功率为 $491 \mu\text{W}$. 结果显示当连续探测光的注入光功率大约为信号光脉冲平均注入光功率的 0.45 倍时, 可获得最大幅度输出的光时钟. 图 9 (b) 所示为提取的光时钟

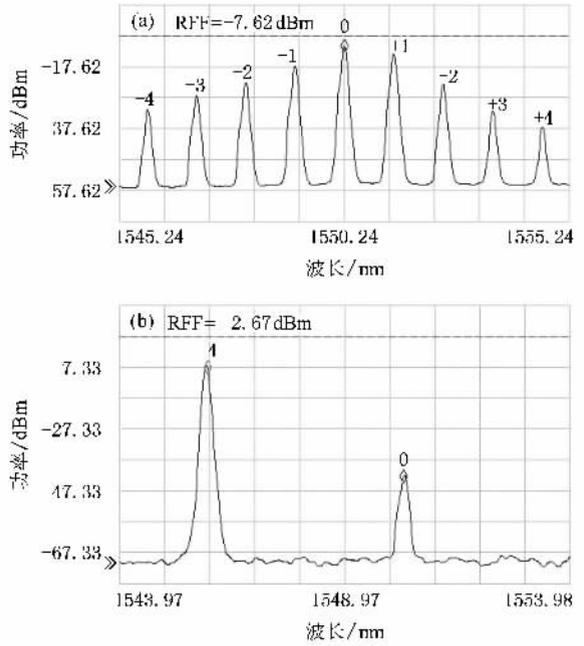


图 7 (a) FP-LD 自由振荡的输出光谱 (b) 探测光经过转换后的光谱

的幅度随信号光脉冲的平均注入光功率的变化曲线, 此时连续探测光注入功率为 $275 \mu\text{W}$. 结果显示

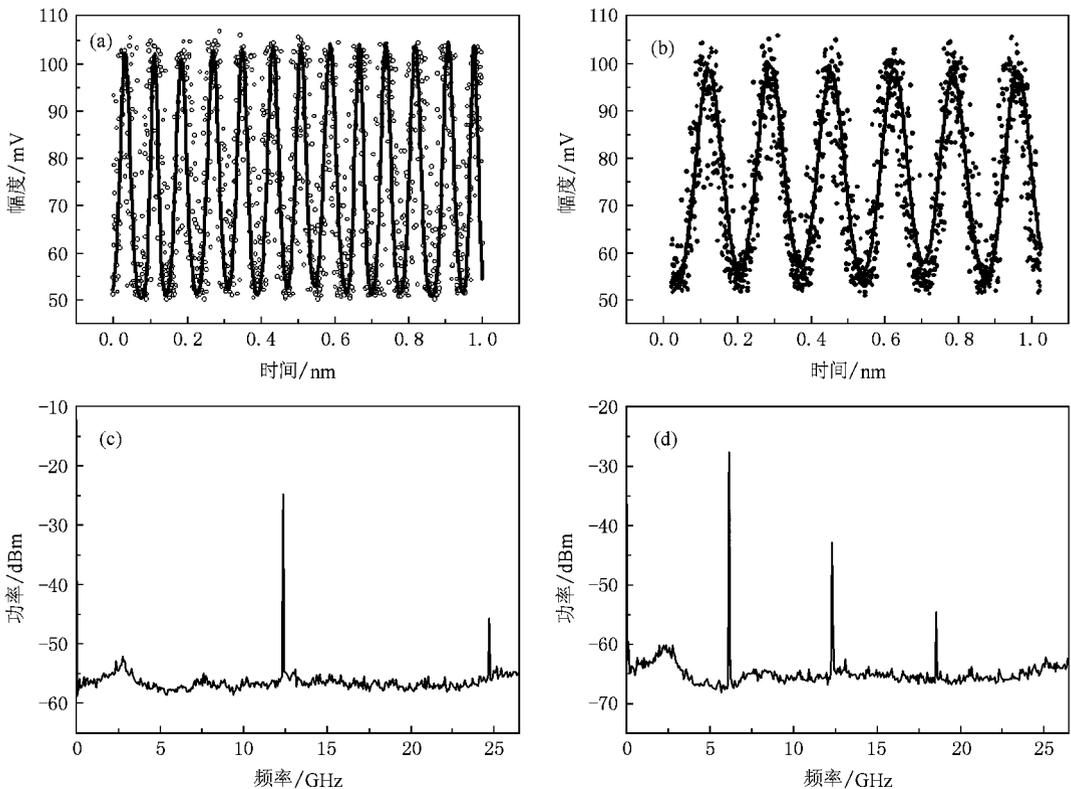


图 8 (a) 注入信号光脉冲的波形 (b) 提取的二分频分路时钟的波形 (c) 注入信号光脉冲的频谱 (d) 提取的二分频分路时钟的频谱

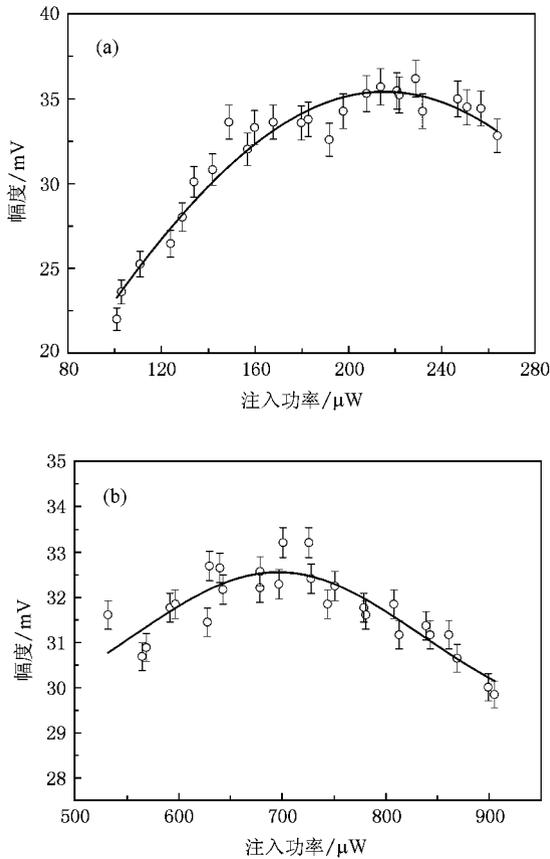


图 9 (a) 探测光注入功率对分路时钟的幅度的影响 (b) 信号光注入平均功率对分路时钟幅度的影响

当信号光脉冲平均注入光功率大约为连续探测光的注入光功率的 2.5 倍时, 输出的光时钟达到最大幅度. 上述结果表明, 在不同的注入光功率下, 探测光和信号光的注入功率比总是存在一个最佳值, 可使输出的光时钟信号幅度最大. 我们认为这是由于信号光和探测光在交叉增益调制效应下对载流子的争夺造成的: 当信号光强度较大时尽管可引起较深程度的光调制, 但是由于过强的信号光会提取大量的载流子使得在极短时间内激光器腔内的载流子未能充分回复, 从而造成探测光增益的下降, 因此提取的转换为探测光波长的光时钟的幅度无法达到最大值, 而当信号光强度较低时, 又会由于光调制深度太低, 使得探测光的增益变化较小, 从而使得所提取的光时钟的消光比较低. 因此只有当信号光和探测光的注入光功率能兼顾调制深度和增益提取时, 才能获得最佳的光时钟输出.

图 10 所示为探测光与被其锁定的纵模的波长失谐量对提取分路光时钟的影响. 波长失谐量定义为 $\Delta\lambda = \lambda_p - \lambda_l$, λ_p 指探测光的波长, λ_l 为被探测光

锁定的纵模的波长. 实验中当波长失谐量为 -0.01 nm 到 0.06 nm 时, 可获得稳定的波长转换和分频时钟提取.

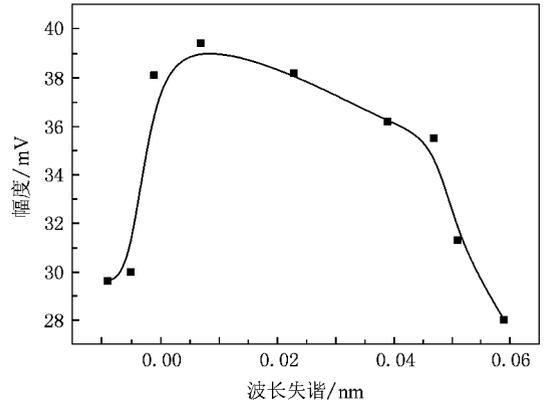


图 10 探测光与 FP 激光器被其锁定纵模的波长失谐对提取光时钟的影响

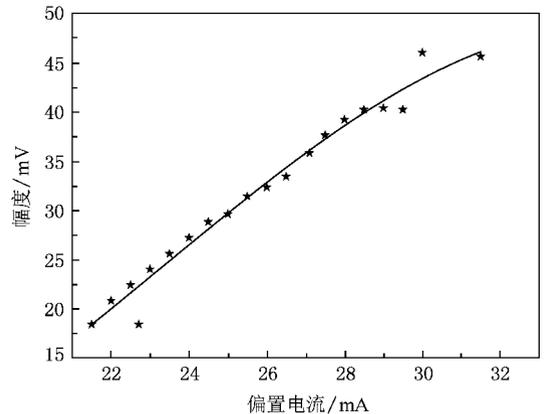


图 11 FP 激光器的偏置电流对提取光时钟的影响

同时, 实验中还研究了 FP 半导体激光器的直流偏置电流水平对波长转换与分频时钟提取的影响, 结果如图 11 所示. 当偏置电流范围为 21.5 mA 至 31.5 mA (即 $1.65 I_{th}$ — $2.42 I_{th}$) 时, 随着驱动电流的增大输出光时钟的峰-峰值亦在增大, 而当偏置电流超出此范围时, 则无法获得稳定的波长转换和分频时钟, 这一结果与数值模拟的结果非常符合.

图 12 所示为信号光锁定中心纵模“0 模”, 探测光锁定不同纵模时光时钟的输出情况. 从图中可以看出, 当探测光锁定“-4 模”时, 可获得最大峰-峰值的光时钟信号输出. 其原因主要是由于 FP-LD 各模式在外部光注入情况下的增益饱和和不均匀性所导致的. 由于在 FP-LD 增益谱中各模式获得的增益不同, 并且在外部信号光注入下各模式的增益变化不

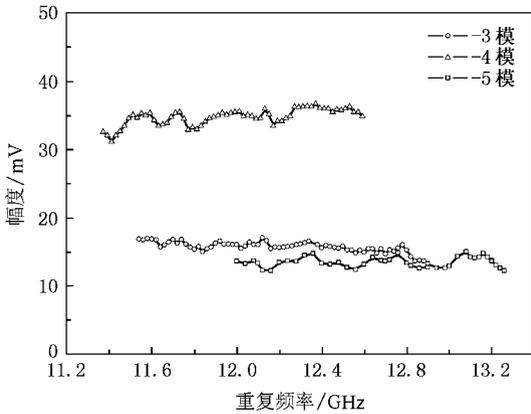


图 12 不同重复频率信号光的分频光时钟提取

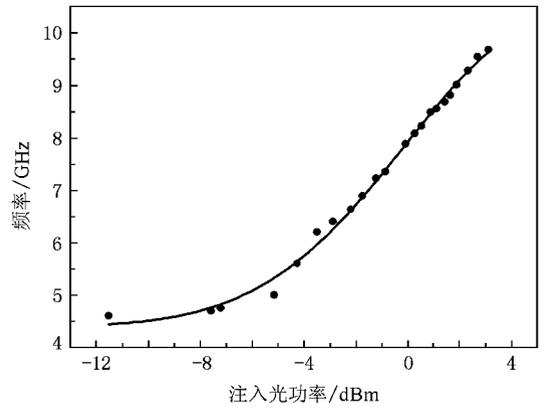


图 13 单周期振荡的基频随注入光功率的变化

同,从而导致基于交叉增益调制效应的波长转换中存在最佳匹配模式.同时可以看出,光脉冲的重复频率在约 1.2 GHz 的范围内,都可通过微调注入光功率而获得各自的分频光时钟.

4. 讨 论

我们在实验中受限于没有可产生随机数据流的伪随机码发生器,故采用高重复频率的光脉冲信号作为 OTDM 信号,将该信号和一束连续探测光注入 FP-LD 后,获得波长转换为探测光波长、频率为注入光脉冲重复频率一半的分频光时钟信号,从而对所提出的方法进行了原理性的实验验证.

光注入半导体激光器产生的非线性单周期振荡的基频频率随注入光功率、波长失谐量的增大而增大,分别如图 13 和图 14 所示.可通过调节注入光功率的大小或注入光与被锁定纵模的波长失谐量来获得不同基频频率的单周期振荡,从而在理论上可对不同速率的 N 路复用的 OTDM 信号进行 $1/N$ 分频的分路光时钟提取.

图 15 所示为光脉冲注入半导体激光器产生非线性单周期振荡现象以及对单周期振荡进行微波锁频实现光脉冲分频输出的物理过程.图 15(a)为 18 GHz 光脉冲信号的频谱图,图 15(b)为此光脉冲信号注入 FP 半导体激光器后产生的单周期振荡现象,图中尖锐的细线为光脉冲信号的频谱,另外较宽的两条谱线为单周期振荡(P1)的基频和二次谐波,此时信号光没有锁定单周期振荡的任何谐波,输出为相位噪声极大的混合信号.随着注入光功率增大,单周期振荡的基频增大,当注入功率达到 2.10 dBm

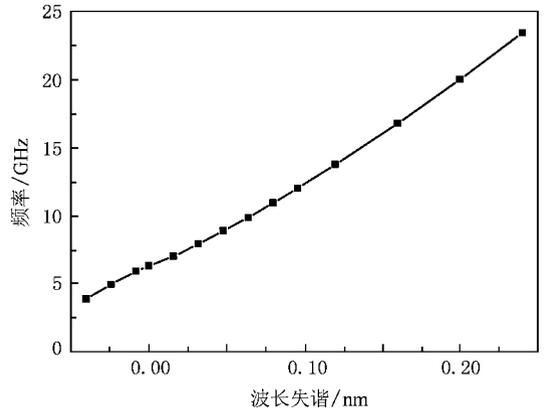


图 14 单周期振荡的基频随波长失谐的变化

时,此时单周期振荡的二次谐波频率接近光脉冲信号的重复频率,光脉冲信号将二次谐波锁定,单周期振荡的基频也被同步锁定,从而输出相位噪声低于 -100 dBc/Hz、重复频率为注入光脉冲重复频率一半的二分频光时钟,如图 15(c)所示.图 15(d)所示为注入光功率降低至 -3.42 dBm 时,单周期振荡的三次谐波频率减小至接近光脉冲信号频率后被锁定,同时二次谐波和基频皆被锁定,从而输出低噪声的三分频光时钟.

5. 结 论

提出了一种实现同步全光分路时钟提取及波长转换的新方法,并进行了理论和实验验证.利用光注入半导体激光器产生的非线性单周期振荡特性和交叉增益调制效应,采用一个 FP 半导体激光器作为全光分路时钟提取及波长转换器,数值模拟实现了从波长为 1555 nm、速率为 2×20 Gb/s 的 OTDM 光信

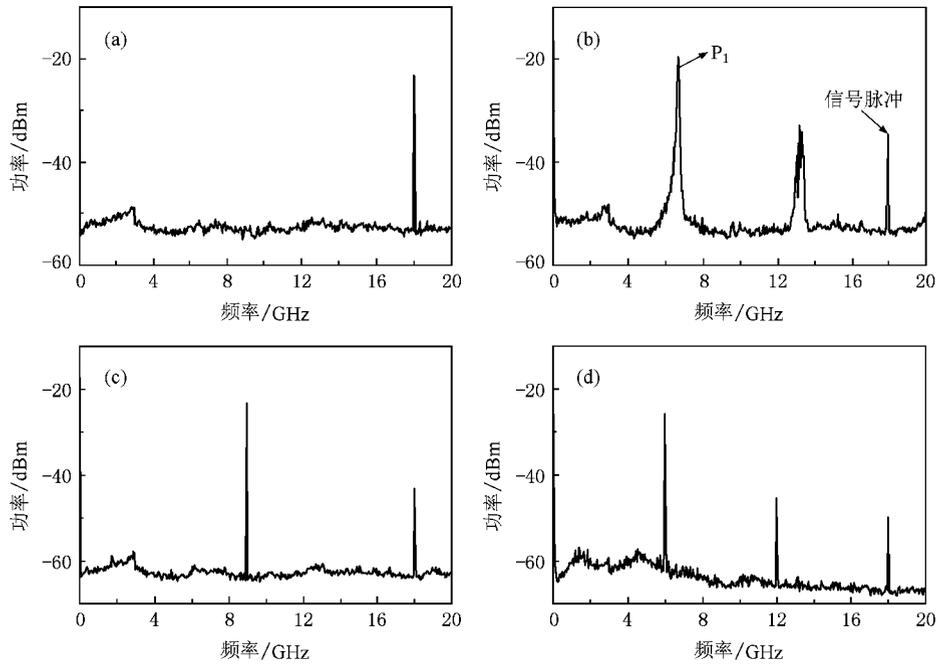


图 15 (a) 18 GHz 信号光脉冲的频谱图;不同注入光功率下 FP 激光器的输出频谱图 (b) - 2.33 dBm (c) 2.10 dBm (d) - 3.42 dBm

号中提取波长转换为 1550 nm、重复频率为 20 GHz 的分路光时钟,实验原理性验证了重复频率 12.36 GHz 光脉冲分频为 6.18 GHz 同时波长由 1550.24 nm 转换为 1545.91 nm 的低相位噪声的分路光时钟提取.进一步,详细研究了注入光功率、探测光波长失谐和 FP 激光器偏置电流对光时钟提取的影响,结果表明存在最佳的探测光与信号光注入功率比可使得所提取的光时钟输出峰值功率最大,当 FP 偏置电流在 $1.65 I_{th}$ — $2.42 I_{th}$,探测光与被锁定纵模波长

失谐量约为 -0.01 nm 到 0.06 nm 时可同时获得稳定的波长转换和分频时钟提取.实验结果和模拟结果符合.此外,研究结果还表明在 FP 激光器偏置电流一定的情况下,注入锁定存在最佳的纵模模式选择可使分频光时钟的输出幅度最大.所得结果表明,该方法可直接从 OTDM 信号中提取波长转换的分路光时钟信号.此技术在未来光时分复用混合波分复用通信系统中具有重要的应用价值.

- [1] Kelly A E, Manning R J, Poustie A J, Blow K J 1998 *Electron. Lett.* **34** 1337
- [2] Lee H J, Kim H G 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 469
- [3] Wang T, Lou C Y, Huo L, Wang Z X, Gao Y Z 2003 *Opt. Laser Technol.* **35** 463
- [4] Yang Y M, Liu H F, Matsuji Y 2000 *Electron. Lett.* **36** 1852
- [5] Attygalle M, Wen Y J 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 478
- [6] Yoo S J B 1996 *J. Lightwave Technol.* **14** 955
- [7] Tzanakaki A, O'Mahony M J, Yu A, Bray M E 1997 *Electron. Lett.* **33** 1554
- [8] Durhuus T, Mikkelsen B, Joergensen C, Danildsen S L, Stubkjaer K E 1996 *IEEE J. Lightwave Technol.* **14** 942
- [9] Watanabe S, Kuwatsuka H, Takeda S, Ishikawa H 1997 *Electron. Lett.* **33** 316
- [10] Kwok C H, Lee S H, Chow K K, Shu C, Lin Chinlon, Bjarklev A 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 2655
- [11] Chow C W, Wong C S, Tsang H K 2003 *Electron. Lett.* **39** 997
- [12] Yoo H, Jeong Y D, Won Y H, Kang M, Lee H J 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 536
- [13] Awad E S, Cho P S, Richardson C R, Moulton N, Goldhar J 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 1378
- [14] Rau L, Wang W, Olsson B E, Chiu Y J, Chou H F, Blumenthal D J, Bowers J E 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 1725
- [15] Simpson T B, Liu J M, Huang K F, Tai K 1997 *Quantum Semiclass. Opt.* **9** 765
- [16] Wang Y C, Zhao Y P, Zhang M J, An Y, Wang J L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6982 (in Chinese)[王云才、赵跃鹏、张明江、安义、王纪龙 2007 物理学报 **56** 6982]
- [17] Hwang S K, Liu J M, White J K 2004 *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **10** 974
- [18] Chan S Z, Hwang S K, Liu J M 2007 *Opt. Express* **15** 14921

- [19] van Tartwijk G H M , Lenstra D 1995 *Quantum Semiclass. Opt.* **7** 87
[20] Jin X M , Chuang S L 2006 *Solid-State Electron.* **50** 1141

Simultaneous all-optical individual channel clock extraction and wavelength conversion using an optically injected Fabry-Perot laser diode *

Lü Yu-Xiang[†] Yang Xing Sun Shuai

(*Physics Department , College of Science , Taiyuan University of Technology , Taiyuan 030024 , China*)

(Received 3 August 2008 ; revised manuscript received 15 December 2008)

Abstract

We propose and demonstrate a novel technique that uses a Fabry-Perot laser diode (FP-LD) to perform simultaneous all-optical individual channel clock extraction and wavelength conversion. The nonlinear dynamical period-1 oscillation can occur when a semiconductor laser is optically injected. By utilizing the cross-gain modulation effect and the period-1 oscillation harmonic frequency-locked in an optically injected semiconductor laser , we can extract the wavelength conversion individual channel optical clock from the optical-time-division-multiplexing (OTDM) signal. In a FP-LD , we numerically simulate the extraction of 20 GHz optical clock at 1550 nm from the 2×20 Gb/s OTDM signal at 1555 nm , and experimentally obtain the -105 dBc/Hz phase noise frequency division clock of 12.36 GHz to 6.18 GHz with simultaneous wavelength conversion from 1550.24 nm to 1545.91 nm. Moreover , we investigate the influence of the injection optical power level , wavelength detuning , the FP-LD 's bias current level and the longitudinal mode selection on the optical clock extraction. This method is potential to technologically apply in the all-optical demultiplexing and wavelength routing in the OTDM mixed wavelength-division-multiplexing (WDM) communication system.

Keywords : wavelength conversion , clock extraction , light injection , nonlinear dynamics

PACC : 4262 , 4255P , 4230Q

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60577019).

[†] E-mail : tyut.lyx@gmail.com