

文章编号: 0253-2239(2001)08-0944-04

基于光纤交叉相位调制效应的全光位时钟提取技术

左 鹏 伍 剑 林金桐

(北京邮电大学光通信中心, 北京 100876)

摘要: 对利用光纤交叉相位调制效应实现全光位时钟提取的过程进行了说明和分析,重点分析了色散位移光纤的长度和入射信号的脉宽和强度、以及走离对输出时钟信号的影响,对时钟信号的啁啾特性进行了讨论和分析。

关键词: 交叉相位调制;色散位移光纤;位时钟提取;走离特性;啁啾特性

中图分类号: TN915.63 文献标识码: A

1 引 言

针对与日俱增的光网络技术需求,未来的超高速光纤通信系统需要适时地对信号进行全光再放大、再定时和再定形(简称为3R再生),以确保下一步信号传输或节点处理的有效性和可重复性。在光时分复用(OTDM)通信系统中,提取位时钟的质量将直接影响再生信号的再定时和再定形的指标要求。较为广泛的位时钟提取技术主要包括:传统电时钟提取,电光锁相环时钟提取,基于注入锁定光纤激光器技术的时钟提取^[1]

传统电时钟提取技术和电光锁相环时钟提取技术都受到电子瓶颈的影响,难以实现高速率(例如超过40 Gbit/s)信号的位时钟的提取。基于以上原因,众多的3R再生实验提出使用光纤锁模技术进行位时钟提取。

1992年,英国电信实验室的Smith和Lucek提出在光纤环内加入非线性光调制器实现全光时钟提取^[2,3]。

1996年,英国电信实验室的Pender等人再次将此技术应用于40 Gbit/s的全光再生实验中^[4]。文献[1]中也提出将半导体光放大器作为非线性光调制器,实现注入锁定的光纤激光器。但目前仍没有对基于光纤注入锁定技术的时钟提取方案进行系统的理论分析和数值模拟。

本文将色散位移光纤作为非线性光调制器应用于光纤激光器中。在建立数值模型的基础上,本文重点分析了色散位移光纤的长度和入射信号的脉宽和强度、以及走离对输出时钟信号的影响。

2 基本原理和数值模型

2.1 位时钟提取的基本原理

图1为利用光纤锁模激光器实现全光位时钟提取的原理框图。

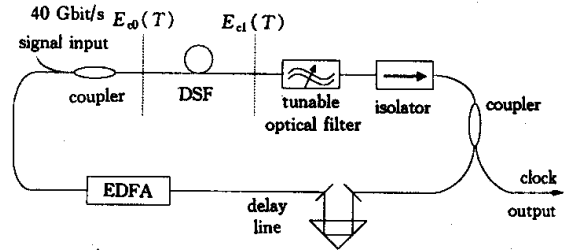


Fig. 1 Schematic of all optical bit clock extraction

图中关键器件为色散位移光纤(DSF),其作用相当于一个光纤相位调制器;可调谐光滤波器的作用是分离入射信号和时钟信号,对应的波长为环内锁定的时钟信号的波长;掺铒光纤放大器(EDFA)在光纤环内作为增益介质,起到放大时钟信号的作用;时延线用来改变光纤环长L以满足下列锁模条件:

$$\omega_m T_t = 2\pi p \quad \omega_c T_t = 2\pi q$$

其中 ω_m 为调制频率; T_t 为光通过环长L所经过的时间; ω_c 为时钟信号光频率; p 和 q 为整数。

系统实现时钟提取的基本原理可理解为相位锁模激光器产生超短光脉冲的基本原理,色散位移光纤相当于相位调制器,入射数据信号通过色散位移光纤中的交叉相位调制效应周期地调制环内时钟信号的相位;当光纤环长与入射数据信号的频率满足上述谐振关系,构成主动锁模的基本条件后,将输出周期性的时钟信号(连续的超短光脉冲)。时钟信号的重复频率与入射数据信号的重复频率一致。

图1中,入射信号和时钟信号的波长应该满足一定条件,使得两波长信号在色散位移光纤中走离时间最小。光纤环内的信号频率受到可调谐滤波器的限制,因而通过调节可调谐滤波器的中心频率,达到减小走离时间的目的。

2.2 理论模型的建立

按照激光器谐振的原理,光场依次通过掺铒光纤放大器、色散位移光纤和滤波器等器件后应该是自洽的。下式给出自洽的场方程:

$$E_{\omega} = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{A} E_{\omega}(T) \} T(\omega) \exp \left[\int g(z) dz \right],$$

式中 $T = t - z/v_{g1}, v_{g1}$ 为入射信号在光纤中的群速度。 \mathcal{F} 和 \mathcal{F}^{-1} 分别表示傅里叶变换和反变换; $E_{\omega}(T)$ 和 $E_{\omega}(T)$ (如图1所示) 为通过色散位移光纤前后的时钟信号光场表达式; $T(\omega)$ 为滤波器透过率曲线; $g(z)$ 为掺铒光纤放大器的增益系数。

同时描述光纤交叉相位调制效应的方程如下(这里忽略了光纤的损耗,并假设入射信号和时钟信号为同偏振态):

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{i}{2} \beta_{21} \frac{\partial^2 A_1}{\partial T^2} = i\gamma_1 (|A_1|^2 + 2|A_2|^2) A_1,$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + d \frac{\partial A_2}{\partial T} + \frac{i}{2} \beta_{22} \frac{\partial^2 A_2}{\partial T^2} =$$

$$i\gamma_2 (|A_2|^2 + 2|A_1|^2) A_2,$$

式中 $d = (v_{g1} - v_{g2}) / (v_{g1} v_{g2})$, A_1 表示入射信号的幅度, A_2 表示时钟信号的幅度; v_{g2} 为时钟信号在色散位移光纤中的群速度; d 表征了入射数据信号与时钟信号之间的走离; γ_i 为非线性常数; β_{21} 和 β_{22} 分别为入射信号和时钟信号的色散常数。

假设色散位移光纤的长度为 L , 则

$$E_{\omega}(T) = A_2(T, z=0),$$

$$E_{\omega}(T) = A_2(T, z=L).$$

理论上,联立以上关系式,就可以得到系统的稳定输出光场。但这些方程联立后过于复杂,无法得到准确的解析结果,因而只能借助数值计算求解。

2.3 数值计算模型的建立

以直流光场为初始条件,让光场依次通过框图中的元件,并且通过反复循环迭代,光场趋于稳定时的解即为稳定解。这个过程将对应时钟提取的自启动过程。

滤波器透过率曲线由高斯函数描述,掺铒光纤放大器的增益系数近似为

$$g(z) = \frac{g_0}{1 + P_s(z)/P_{\text{sat}}},$$

式中 $P_s(z)$ 为掺铒光纤放大器中的信号功率, P_{sat} 为掺铒光纤放大器的饱和输出功率, g_0 为小信号增益系数。

由于光纤的交叉相位调制效应,时钟信号引入的非线性相移可以描述为

$$\Delta\Phi_{\text{NL}} = \gamma_2 L (|A_2|^2 + 2|A_1|^2),$$

这里既包含交叉相位调制效应引入的相移(上式第二项),也包含自相位调制效应引入的相移(上式第一项)。通常时钟信号的幅度受到掺铒光纤放大器饱和输出功率的限制。在入射信号幅度远大于时钟信号的幅度的条件下,将忽略自相位调制效应的影响,主要计算交叉相位调制引入的非线性相位 $\Delta\Phi_{\text{NL}}$ 对时钟信号的影响。下文使用的 $\Delta\Phi_{\text{NL}}$ 将只考虑交叉相位调制效应的作用。需要指出的是,入射光强和色散位移光纤长度的综合作用体现在 $\Delta\Phi_{\text{NL}}$ 之中。因而下文的分析将建立 $\Delta\Phi_{\text{NL}}$ 对系统的影响。

在建立的数值模型中,假设光纤环内的平均色散为零,入射信号为高斯脉冲。光纤环内的初始光场在时域为连续光,在频域为单频。

3 数值结果与讨论

3.1 时钟信号波形和频谱

入射信号为脉宽 20 ps、重复速率 40 Gbit/s 的伪随机码序列时,所获得的时钟信号的波形及光谱如图2和图3所示。选取非线性相移 $\Delta\Phi_{\text{NL}} = 4\pi$, 针对理想情况选取 $d = 0$; 高斯型滤波器 3 dB 带宽为 3 nm, 耦合器比值为 1:1。

图3中,谱间隔为 40 GHz, 对应了时钟信号的重复频率。输出的时钟信号的宽度为 2.62 ps, 消光比大于 20 dB, 光谱宽度为 105.1 GHz。这里光谱的宽度是通过计算高斯拟合曲线的宽度得到的。在脉

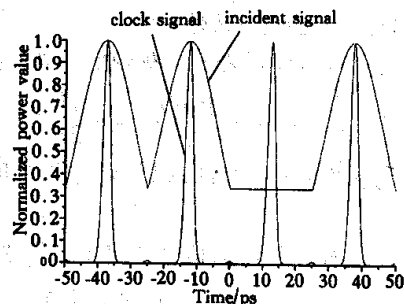


Fig. 2 Waveform of incident signal and bit clock signal

冲中央存在由交叉相位调制效应引起的线性负啁啾,可以获得脉冲的线性压缩。如果用色散补偿光纤(DCF)可以对上述时钟信号进行压缩,可以得到脉宽为 2.02 ps 的脉冲。

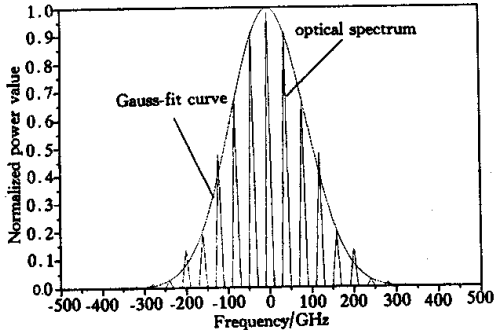


Fig. 3 Spectrum of clock signals

3.2 时钟信号的脉宽特性

图 4 为理论计算的入射信号脉宽、非线性相移 $\Delta\Phi_{NL}$ 对输出时钟信号的影响。图 4 中,横轴单位为 $\pi \Delta\Phi_{NL}$ 的计算范围是从 $0.2\pi \sim 4\pi$; $\Delta\Phi_{NL}$ 由入射功率和色散位移光纤光纤长度共同确定。各曲线都是在没有走离的条件下分析的。

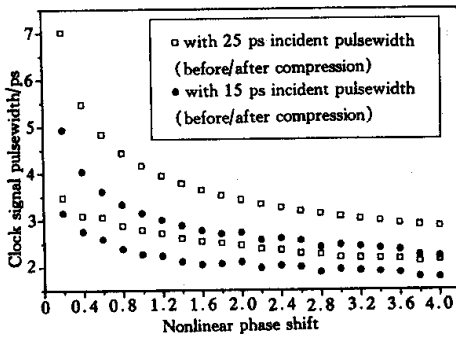


Fig. 4 Pulsewidth of clock signal versus $\Delta\Phi_{NL}$ with various incident signal pulsewidth

分析图 4 结果可知,输出时钟信号的脉宽随 $\Delta\Phi_{NL}$ 的增加而减小;但当 $\Delta\Phi_{NL} > 2\pi$ 之后,脉宽的改善将不明显。输出时钟信号的脉宽随入射信号脉宽的减小而减小。

3.3 时钟信号的啁啾特性

定义啁啾参量 C 和归一化啁啾参量 C_{nom} 为:

$$C_{nom} = -\frac{\tau^2}{2\pi} \frac{d^2 \phi(t)}{dt^2} = -\frac{\tau^2}{2\pi} C,$$

式中 τ 为输出时钟信号的脉宽, $\phi(t)$ 为时钟信号的相位。

定义压缩比率 R 为信号压缩前后脉宽的比值。

同时取 $R' = \sqrt{1 + 4C_{nom}^2}$, 此式是计算压缩比率的经验公式。

由图 5 可知,压缩比率 R 可以通过计算得到的 R' 近似描述,因而归一化啁啾参量的数值将反映信号的压缩潜力。随着 $\Delta\Phi_{NL}$ 的增加,啁啾参量 C 增加,归一化啁啾参量 C_{nom} 将减小。

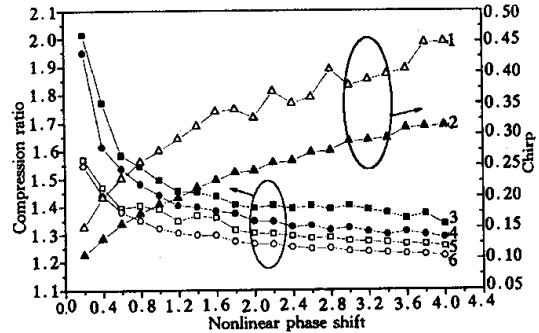


Fig. 5 Chirp characteristic curve of clock signal. 1, 2: chirp versus nonlinear phase shift with 15 ps and 25 ps incident pulsewidth respectively; 3, 5: compress ratio versus nonlinear phase shift with 25 ps and 15 ps incident pulsewidth respectively; 4, 6: equivalent compress ratio versus nonlinear phase shift with 25 ps and 15 ps incident pulsewidth respectively

3.4 走离的影响

在图 6 中,分析了不同走离条件下,高斯脉冲仅通过一定长度的色散位移光纤之后引入啁啾的情况。随着 d 的增加,由入射信号引入的啁啾逐渐减小,两个频偏最大值之间的距离逐渐增加,相当于功率小、脉宽大的信号入射到 $d = 0$ 的色散位移光纤光纤中得到的啁啾分布。由图 4 分析可知,在入射信号功率减小、脉宽加宽的同时,输出的时钟信号将相应地展宽。由此可以证明,随着走离的增加,输出的时钟信号的脉宽将加大。

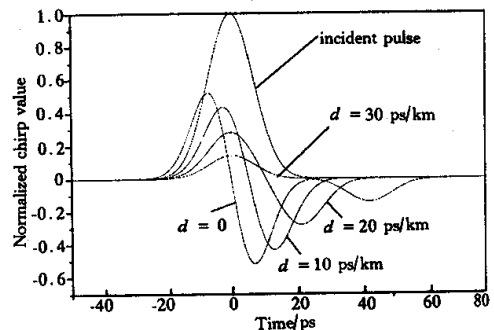


Fig. 6 Chirp curve of clock signal with various d

图 7 的数值模拟显示:在入射脉宽为 15 ps 的条件下,走离对输出时钟信号的影响。

比较图 7 中 $d = 0$ 和 $d = 5$ ps/km 两种情况,当 $\Delta\Phi_{NL} < 2\pi$ 时,走离的影响并不显著,两条曲线基本重合;但当非线性相移增大时,走离的影响表现为时

钟信号的展宽。数值模拟结果与图 6 的分析一致。

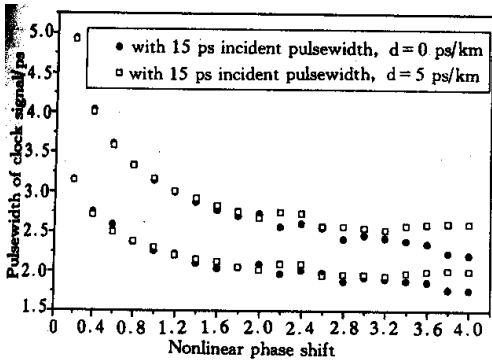


Fig. 7 Pulsewidth of clock signal versus $\Delta\Phi_{NL}$ with various d .

□: with 15 ps incident pulsewidth, $d = 0$; ■: with 15 ps incident pulsewidth, $d = 5$ ps/km

结论 利用光纤锁模技术可以有效地全光提取光时分复用信号的位时钟。本文在建立的数值模型的基础上,对脉冲宽度为 20 ps 的 40 Gbit/s 伪随机码信号进行时钟提取,初始光场在时域为连续光的条件下,获得消光比大于 20 dB 的光脉冲信号输出,而且针对不同光纤长度、不同入射条件,给出了一系列曲线,系统地分析了各个参数对系统的影响,包括时钟信号的脉宽特性和啁啾特性,得出以下结论:

- 1) 输出时钟信号的脉宽随非线性相移的增加而减小,随入射信号的脉宽的增加而增加;
- 2) 随着环内非线性相移的增加,啁啾参量增

加,归一化啁啾参量 C_{norm} 减小,压缩比率减小;

3) 当非线性相移增加时,走离的影响表现为时钟信号的展宽。

而且,在 $\Delta\Phi_{NL} < 0.2\pi$ 的条件下,无法使最后的时钟输出趋于稳定,当入射信号的消光比小于 3 dB 时结果也是如此。因而应用该时钟提取技术时的基本条件为:

$$\Delta\Phi_{NL} > 0.2\pi, \text{入射信号消光比大于 } 3 \text{ dB.}$$

同时考虑到,当 $\Delta\Phi_{NL} > 3\pi$ 时,色散位移光纤中的走离现象对脉宽的影响显著,建议选取 $\Delta\Phi_{NL}$ 在 2π 和 3π 之间为宜。

参 考 文 献

- [1] Bigo S, Leclerc O, Desurvire E. All-optical fiber signal processing and regeneration for soliton communications. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, 3(5):1208~1223
- [2] Smith K, Lucek J K. All-optical clock recovery using a mode-locked laser. *Electron. Lett.*, 1992, 28(19):1814~1816
- [3] Adams L E, Kintzer E S, Fujimoto J G. All-optical timing extraction at 40 GHz using a mode-locked figure-eight laser with an SLA. *Electron. Lett.*, 1995, 31(20):1759~1761
- [4] Pender W A, Widdowson T, Ellis A D. Error free operation of a 40 Gbit/s all optical regenerator. *Electron. Lett.*, 1996, 32(6):567~569

All Optical Bit Clock Extraction Technology Based on Fiber Cross Phase Modulation Effects

Zuo Peng Wu Jian Lin Jintong

(The Center for Communication, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

(Received 27 March 2000; revised 26 June 2000)

Abstract: All optical bit clock extraction technology based on fiber cross phase modulation effects is illustrated and analysed. Intensity and pulsewidth of incident signal, the length of dispersion shift fiber (DSF) and walk-off between incident and clock signal influenced the output clock intensively. The relations between them are discussed and the chirp character of clock signal is analysed.

Key words: cross phase modulation; dispersion shift fiber; bit clock extraction; walk-off; chirp