

拍频自反馈锁模光纤环形激光器

李玉华 娄彩云 刘 军 高以智

(清华大学电子工程系 北京 100084)

提要 报道一种由光纤环形激光器的拍频信号中提取高重复率正弦电信号,并以此信号调制腔内强度调制器,实现调制频率与腔长自适应的主动锁模方法。采用此方法获得重复率为 2.5 GHz,脉宽为 11 ps 的变换极限超短光脉冲。

关键词 光纤环形激光器,主动锁模,变换极限超短光脉冲,拍频自反馈

1 引 言

自 1993 年以来,突破百 Gbit/s 以上的光时分复用(OTDM)及光时分/波分复用(OTDM/WDM)超高速光通信实验系统的发射源普遍采用主动锁模光纤环形激光器(AM-EDFLs)代替过去采用的增益开关半导体激光器及锁模半导体激光器^[1,2],其原因是它具有波长可调谐、可输出高重复率大功率变换极限超短光脉冲(无需消啁啾)等优点。

主动锁模光纤环形激光器通常由掺铒光纤放大器(EDFA)、铌酸锂(LiNbO₃)强度调制器、滤波器及其它光纤及光纤器件组成(示于图 2 虚线框中)。腔长一般在数十米至数百米的量级,对应的纵模间隔为几百 kHz 至几 MHz。为了获得高重复频率的脉冲,主动锁模光纤环形激光器通常工作在谐波锁模状态,施于调制器的调制信号频率必须严格等于纵模间隔的整数倍。所以腔长和调制频率的严格匹配是实现高质量主动锁模的技术关键和难点^[3]。并且由于光纤长度对外界环境如温度、机械振动的敏感必然导致二者的不匹配,从而导致输出光脉冲幅度的不稳定,甚至完全消失。

为了实现主动锁模光纤环形激光器的稳定运转,通常需提取腔长与调制频率失调时的误差信号控制腔长,使其严格与调制频率匹配^[4,5]。本文采取一种拍频自反馈的方法实现调制频率与腔长的自动匹配,达到自稳定主动锁模,得到重复频率为 2.5 GHz,脉宽为 11 ps 的变换极限超短光脉冲。

2 拍频自反馈锁模的工作原理

在光纤环形激光器内,可以存在许许多多的纵模,纵模间隔 $\Delta\nu_q = c/nL$,其中 n 为光纤的折射率, L 为环形腔的长度。用一个高速光电探测器接收输出的光信号,得到的电信号含有上述各个纵模之间的拍频,各拍频分量的频率是 $\Delta\nu_q$ 的整数倍,相邻拍频分量的频率间隔为 $\Delta\nu_q$,

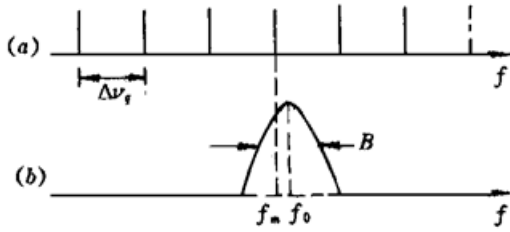


图 1 拍频自反馈的原理示意图

(a) 拍频信号; (b) 拍频信号提取电路的频响特性

Fig. 1 Illustration of beat signal feedback

(a) Beat signal; (b) Transmission characteristic of the beat signal extraction circuit

如图 1(a)。将其注入一个中心频率为 f_0 、带宽为 B 的拍频信号提取电路(其频率特性如图 1(b)所示)。只要 B 足够窄,就可以滤出其中的一个频率为 $f_m = N \Delta \nu_r \approx f_0$ (N 为整数)的拍频分量,形成频率为 f_m 的正弦波电压,作适当的相位调整以后将其作为调制信号施于调制器上,由于调制器的周期性损耗调制作用,导致频率间隔为 $N \Delta \nu_r$ 的纵模相位锁定,从而实现重复频率为 f_m 的谐波锁模,谐波锁模阶数为 N 。

拍频自反馈锁模光纤激光器与普通主动锁模光纤激光器主要的不同之处在于其调制信号由拍频自反馈电路提供,不再需要一个高稳定度的频率合成器。由于拍频信号本身源自腔内纵模的拍频,它精确反映了腔长的瞬时变化,虽然反馈到调制器上的调制信号有一定的延时,但是由于腔长的变化是一个缓变的过程,在反馈回路中,信号以接近于光速的速度传输,在这段时间内,腔长的变化完全可以忽略,因此可以实现调制频率与腔长的动态匹配,谐波锁模状态得以保持。在激光器开始运行时,在反馈电路通带中心附近的连续激光纵模的拍频被不断放大,它反馈到调制器上以后在腔内引入一个周期性的损耗。在相位正好合适的情况下,以该拍频信号频率为重复频率的脉冲被不断放大,最后与损耗达到平衡,形成稳定的锁模脉冲输出。因此拍频自反馈锁模光纤激光器的谐波锁模状态是自动建立的。

3 实验装置及实验结果

拍频自反馈锁模光纤环形激光器的实验装置如图 2 所示。虚线框内的部分是一个普通的主动锁模光纤环形激光器,由掺铒光纤放大器、1:9 耦合器、偏振控制器、LiNbO₃ 强度调制器、可调谐光纤滤波器组成。掺铒光纤放大器提供光信号增益,增益带宽为 40 nm,小信号增益为 40 dB。在掺铒光纤放大器输入输出端有两个内置的光隔离器,用以保证主动锁模光纤环形激光器的单向运转。LiNbO₃ 强度调制器是实现主动锁模的关键器件。由于其偏振敏感特性,因而在其输入端加了一个偏振控制器,以保证最佳的调制效率。可调谐光纤滤波器带宽为 1 nm,用以在掺铒光纤放大器的增益带宽范围内自由选择波长。光纤腔由非保偏的光纤及器件组成,除掺铒光纤外,其余光纤均为普通单模光纤,光纤腔的总长度为 69 m,对应的纵模间隔为 3 MHz。

图 2 中虚线框外的部分则用于拍频自反馈锁模,经 1:9 耦合器输出到腔外的光信号再经过一个耦合器分出其中一小部分光馈入高速光电探测器,检测出在探测器带宽范围内的所有拍频信号。拍频信号提取电路的通带中心频率为 2.490 GHz,用于选出频率接近于 2.490 GHz 的拍频信号,并通过移相器馈入 LiNbO₃ 调制器。移相器的作用是调整调制信号的相位,使腔

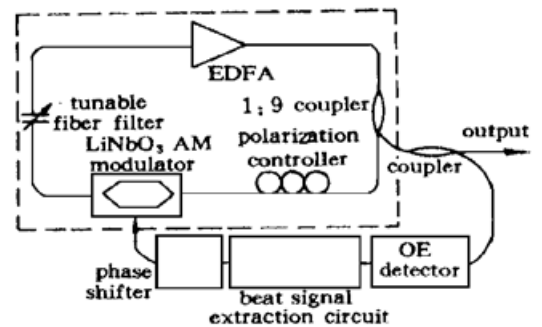


图 2 拍频自反馈锁模光纤环形激光器的示意框图

Fig. 2 Schematic diagram of a beat signal feedback modelocked fiber ring laser

内脉冲每次经过调制器时都对应其最大透过率状态。

利用图 2 所示的拍频自反馈锁模光纤环形激光器, 我们得到了重复频率为 2.490 GHz, 平均功率为 2.9 mW 的稳定脉冲输出。在实验过程中即使用热吹风给光纤加热, 即人为地使腔内光纤的长度发生剧烈变化, 输出波形仍然保持稳定。由于拍频自反馈锁模光纤环形激光器的自启动特性, 在同样的工作条件下每次重新开机都可以得到稳定的脉冲输出。

由于主动锁模光纤环形激光器的输出只是腔内激光的一小部分, 因此腔内的光功率很大。在腔内光纤为反常色散的情况下, 非线性的自相位调制效应将会起到压窄脉冲的作用。在上述激光器中, 改变 EDFA 的泵浦功率, 我们比较了不同泵浦条件下的输出脉冲宽度。在平均输出光功率分别为 1.5 mW, 2.0 mW, 2.9 mW 三种情况下输出脉冲的 SHG 曲线分别如图 3 (a), (b), (c) 所示, 经标定后对应的脉宽(半高全宽)分别为 20 ps, 14 ps, 11 ps。三种情况下腔内在 EDFA 后的脉冲峰值功率分别为 300 mW, 571 mW, 1054 mW。在稳定工作时, 主动锁模光纤激光器可以等效为周期性链路中的一阶孤子传输, 脉冲峰值功率 $P_p = P_1 \propto \frac{|\beta_2|}{\gamma \tau^2}$, 其中 P_1 为一阶孤子峰值功率, τ 为脉冲宽度, β_2, γ 分别为一阶色散常数和非线性系数^[6]。在一定的 β_2 与 γ 的条件下, P_p 与 τ^2 的乘积为常数, 上述实验结果基本符合这一关系。

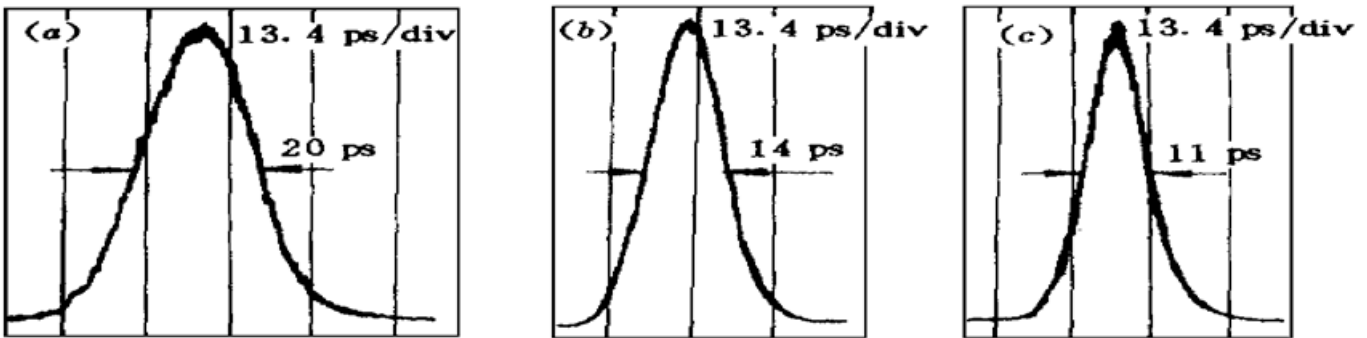


图 3 不同泵浦条件下输出脉冲的 SHG 曲线

(a) 平均输出功率为 1.5 mW; (b) 平均输出功率为 2.0 mW; (c) 平均输出功率为 2.9 mW

Fig. 3 Pulse train autocorrelation at different pump levels

(a) 1.5 mW mean power output; (b) 2.0 mW mean power output; (c) 2.9 mW mean power output

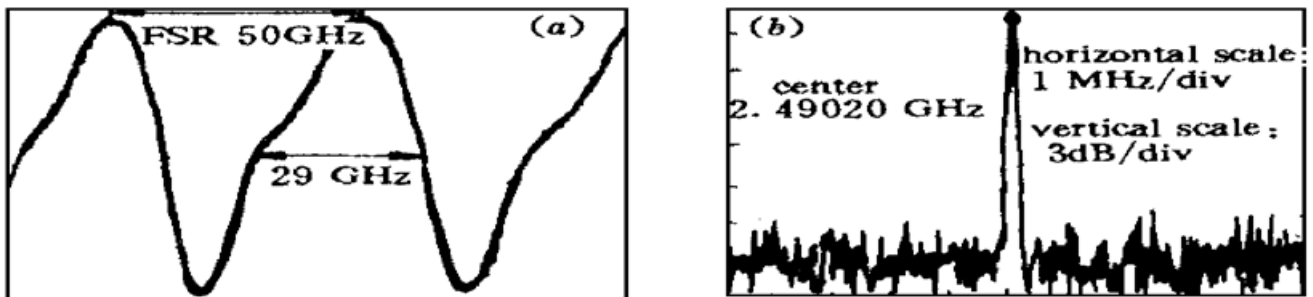


图 4 在平均输出功率为 2.9 mW 时输出脉冲的有关特性

(a) 用扫描干涉仪测得的频谱波形; (b) 在频谱仪上观察到的微波谱

Fig. 4 Laser pulse characteristic with 2.9 mW mean power output

(a) Spectrum profile; (b) RF spectrum

针对上述输出脉冲最窄的情况, 即平均输出光功率为 2.9 mW 时, 我们测量了输出光脉冲

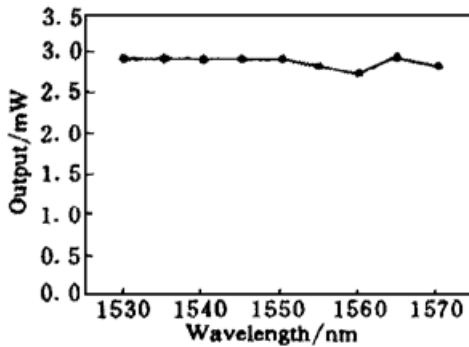


图5 激光输出功率随波长的调谐曲线

Fig. 5 Laser output tuning curve

曲线比较光滑, 脉冲质量较好。

在泵浦功率最大的情况下, 调谐腔内的光纤滤波器(调谐范围 40 nm、带宽 1 nm)可实现输出波长为 1530 ~ 1570 nm 的自由调谐, 调谐曲线如图 5 所示。

的谱宽与微波谱。用光谱仪测出输出光的中心波长为 1563 nm。为了精确测量谱宽, 我们用自由谱区(FSR)为 50 GHz 的扫描干涉仪观察到的频谱波形如图 4(a) 所示, 对应谱宽为 29 GHz。输出脉冲的时间带宽积为 0.32, 接近于双曲正割波形的变换极限值 0.315。图 4(b) 为输出光信号对应的微波谱, 从微波谱上可以得到输出脉冲的重复频率为 2.490 GHz, 正好处在拍频信号提取电路的中心位置。从输出光信号的微波谱看不到明显的超模噪声, 即 2490 ± 3 MHz, 2490 ± 6 MHz 等频率分量, 因此脉冲的 SHG

参 考 文 献

- 1 S. Kawanishi, H. Takara, T. Morioka *et al.*. 400 Gbit/s TDM transmission of 0.98 ps pulses over 40 km employing dispersion slope compensation. OFC '96, San Jose California U.S.A. : Optical Society of America, 1996, PD24-2
- 2 T. Morioka, H. Takara, S. Kawanishi *et al.*. 100 Gbit/s (10 channel OTDM/WDM transmission using a single supercontinuum WDM source. OFC '96, 1996, PD21-2
- 3 D. J. Richardson. Fibre-based short pulse generation and shaping technology. ECOC '95, 1995, Mo. L. 4. 4 : 147~ 154
- 4 X. Shan, D. Cleland, A. Ellis. Stabilising Er fibre soliton laser with pulse phase locking. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(2) : 182~ 184
- 5 H. Takara, S. Kawanishi, M. Saruwatari. Stabilization of a modelocked Er-doped fibre laser by suppressing the relaxation oscillation frequency component. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(4) : 292~ 293
- 6 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics. San Diego : Academic Press, 1989

Beat Signal Feedback Mode-locked Fiber Ring Laser

Li Yuhua Lou Caiyun Liu Jun Gao Yizhi

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract An active modelocking technology of fiber ring laser by beat signal feedback is reported. The modulation frequency is self adaptable with the cavity length when an amplitude modulator is driven by the high repetition beat signal extracted from the cavity. The transform limited ultra-short pulses of 11 ps with a 2.5 GHz repetition rate have been obtained.

Key words fiber ring laser, active modelocking, transform limited ultra-short pulses, beat signal feedback