

基于Mach-Zehnder干涉仪的自相似激光器压缩系统设计

庞亮雨, 张巧芬, 高梓皓, 陈楚浜, 吴铭扬

Design of self-similar laser compression system based on Mach-Zehnder interferometer

引用本文:

庞亮雨,张巧芬,高梓皓,陈楚浜,吴铭扬. 基于Mach-Zehnder干涉仪的自相似激光器压缩系统设计[J]. [激光技术](#), 2023, 47(6): 803-810.

PANG Liangyu, ZHANG Qiaofen, GAO Zihao, et al. Design of self-similar laser compression system based on Mach-Zehnder interferometer[J]. [Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays](#), 2023, 47(6): 803-810.

您可能感兴趣的其他文章

1. 波长可调谐的锁模柱矢量光纤激光器

引用本文: 吕家亮, 姚培军, 许立新. 波长可调谐的锁模柱矢量光纤激光器[J]. [激光技术](#), 2023, 47(4): 454-458.

2. 光纤中光脉冲的直线平移及幅度衰减振荡特性

引用本文: 伍璐璐, 钟先琼, 白乐, 等. 光纤中光脉冲的直线平移及幅度衰减振荡特性[J]. [激光技术](#), 2020, 44(6): 706-709.

3. 高斯-谢尔脉冲在单模光纤中的传输特性研究

引用本文: 黄艳. 高斯-谢尔脉冲在单模光纤中的传输特性研究[J]. [激光技术](#), 2019, 43(6): 841-845.

4. 三谱线、高功率窄线宽纳秒光纤激光器

引用本文: 李川, 陈安涛, 赵文娟, 等. 三谱线、高功率窄线宽纳秒光纤激光器[J]. [激光技术](#), 2019, 43(6): 753-756.

5. 单脉冲锁模光纤激光器输出特性的数值研究

引用本文: 王健, 唐信, 林静, 等. 单脉冲锁模光纤激光器输出特性的数值研究[J]. [激光技术](#), 2017, 41(6): 784-787.

文章编号: 1001-3806(2023)06-0803-08

基于 Mach-Zehnder 干涉仪的自相似激光器压缩系统设计

庞亮雨¹, 张巧芬^{2*}, 高梓皓¹, 陈楚滨¹, 吴铭扬¹

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006; 2. 广东工业大学 精密微电子制造技术重点实验室, 广州 510006)

摘要: 为了研究自相似脉冲在 Mach-Zehnder 干涉仪的压缩特性, 采用非线性薛定谔方程对自相似脉冲的演化和压缩进行了模拟, 分析了基于级联单模光纤的 Mach-Zehnder 干涉仪的光纤参数对脉冲压缩的影响。结果表明, 在不考虑高阶色散的情况下, 当上臂的两种单模光纤长度分别为 8.16 m 和 2.16 m、下臂的单模光纤长度为 8.16 m 时, 获得半峰全宽为 27.85 fs、峰值功率为 1860.59 W、基座能量比例为 10.241% 的最佳压缩脉冲; 考虑高阶色散时, 脉冲在单模光纤中传输呈现出峰值功率增大、基座增大的现象, 且脉冲右移不利于输出基座较小的压缩脉冲; 当 3 阶色散系数小于 0.001 ps³/km 时, 利用 Mach-Zehnder 干涉仪来压缩能获得质量较好的飞秒脉冲。该研究结果对于自相似脉冲的压缩研究具有一定的参考价值。

关键词: 光纤光学; Mach-Zehnder 干涉仪; 自相似脉冲; 超短脉冲; 基座能量比例; 单模光纤

中图分类号: O437 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.06.011

Design of self-similar laser compression system based on Mach-Zehnder interferometer

PANG Liangyu¹, ZHANG Qiaofen², GAO Zihao¹, CHEN Chubang¹, WU Mingyang¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Key Laboratory of Precision Microelectronics Manufacturing Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to study the compression characteristics of the self-similar pulse in the Mach-Zehnder interferometer (MZI), the evolution and compression of the self-similar pulse were simulated by using the nonlinear Schrödinger equation. The influence of the fiber parameters on pulse compression of the MZI based on the cascade single-mode fiber was analyzed. The results show that without considering the high-order dispersion, when the length of the two single-mode fibers in the upper arm is 8.16 m and 2.16 m, respectively, and the length of the single-mode fiber in the lower arm is 8.16 m, the optimal compression pulse is obtained with the full width at half maximum of 27.85 fs, peak power of 1860.59 W and the pedestal energy ratio is 10.241%. When high-order dispersion is considered, it is found that pulse transmission in single-mode fiber presents the phenomenon of the peak power increase and the pedestal energy ratio increase, and the right shift of pulse is not favorable to output compression pulse with a small pedestal. When the third-order dispersion is less than 0.001 ps³/km, femtosecond pulses of good quality can be obtained by using MZI compression. The result of this study has certain reference values for self-similar pulse compression research.

Key words: fiber optics; Mach-Zehnder interferometer; self-similar pulse; ultrashort pulse; pedestal energy ratio; single-mode fiber

引言

高功率超短脉冲^[1]由于超强特性和较高的峰值功率而被广泛应用, 如光时分复用通信^[2]、金属玻璃激光切割^[3]、纳米连接^[4]等等。高功率超短脉冲可以通过价格昂贵的锁模激光器^[5-8]直接产生, 或者通过脉冲压缩技术^[9-13]获得。大多数的锁模激光器^[14]产生的脉冲脉宽低至几皮秒, 再通过脉冲压缩方法来获得

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (61705045); 佛山市高校教师特色创新研究项目 (2021DZXX15)

作者简介: 庞亮雨 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光通信技术。

* 通讯联系人。E-mail: zhqf@gdut.edu.cn

收稿日期: 2022-10-14; 收到修改稿日期: 2022-11-23

飞秒脉冲。在最近的研究中,不少学者通过级联单模光纤来获取峰值功率较高的超短脉冲,虽然能够获得峰值功率高的超短脉冲,但是脉冲基座较大^[15-16]。马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer, MZI)^[17]作为脉冲压缩方法之一,其优点是在获取脉宽较窄的脉冲同时能够减小基座脉冲能量。自相似脉冲^[18-21]能够在传输过程中保持波形不分裂且啁啾严格线性,非常有利于通过脉冲压缩技术来获得高功率的超短脉冲。基于此,本文作者研究设计了一种基于级联单模光纤的 MZI 的自相似锁模激光器脉冲压缩系统。

本文中中心波长为 1550 nm 的高斯脉冲输入自相似锁模激光器中,主要研究了自相似脉冲的演化情况以及自相似脉冲在 MZI 的压缩特性。本文作者将具有不同 2 阶色散的单模光纤级联起来,分析了脉冲的峰值功率、半峰全宽等参数,优化设计了干涉仪上下臂的单模光纤的最佳长度,最后分析了 3 阶色散对于脉冲压缩的影响。

1 自相似脉冲产生及 MZI 的理论分析

自相似脉冲可由光纤激光器、色散渐减光纤或非线性渐增光纤产生,本文中采用掺铒锁模激光器来实现自相似脉冲的演化。分别构建激光器和 MZI 的数值分析模型,便于分析脉冲在演化和压缩时的传输特性。

1.1 自相似锁模激光器数值分析模型

自相似锁模激光器能够将任何类型的输入脉冲演化成自相似锁模脉冲。这种激光器由抽运光源、掺铒增益光纤(erbium-doped gain fiber, EDF)、滤波器、波分复用耦合器(wave division multiplexing coupler, WDM)、可饱和吸收体(saturable absorber, SA)、耦合器(output coupler, OC)、色散补偿光纤(dispersion compensation fiber, DCF)及单模光纤(single-mode fiber, SMF)组成,如图 1 所示。

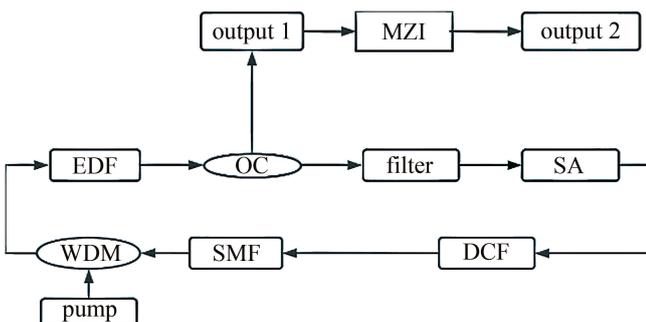


图 1 自相似锁模激光器及压缩系统图

Fig. 1 Self-similar mode-locked lasers and compression systems

增益光纤采用掺铒光纤,脉冲在增益光纤中的传输方程表示为^[22]:

$$\frac{\partial u(z, T)}{\partial z} = -i \frac{\beta_{\text{EDF},2}}{2} \frac{\partial^2 u(z, T)}{\partial T^2} + i\gamma_{\text{EDF}} |u(z, T)|^2 u(z, T) + \frac{g_{\text{pulse}}}{2} \left[u(z, T) + T_2^2 \frac{\partial^2 u(z, T)}{\partial T^2} \right] \quad (1)$$

式中, z 为光脉冲在光纤中的传播距离, $u(z, T)$ 为脉冲包络的慢变幅值, 时间量度 T 在一参照系中随脉冲以群速度 $v_g(T=t-z/v_g)$ 运动而测量, t 为时间, $\beta_{\text{EDF},2}$ 为增益光纤的 2 阶色散, $\beta_{\text{EDF},2} = 23 \text{ ps}^2/\text{km}$, γ_{EDF} 为增益光纤的非线性系数, $\gamma_{\text{EDF}} = 4.7 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, g_{pulse} 为增益总量, $g_{\text{pulse}} = g_0 / (1 + E_{\text{pulse}}/E_{\text{sat}})$, 小信号增益系数 $g_0 = 30.4 / \text{m}$, E_{pulse} 为光脉冲的能量, E_{sat} 为增益饱和能量, $E_{\text{sat}} = 60 \text{ pJ}$, 增益带宽时间 $T_2 = \lambda^2 / (2\pi c \Delta\lambda)$, λ 为输入脉冲的波长, c 为光速, $\Delta\lambda$ 为增益带宽。

耦合器将一部分的脉冲输出, 输出的比例为 10%。

可饱和吸收体透射率表示为:

$$T_{\text{sa}} = 1 - L_0 \times \left(1 + \frac{P}{P_{\text{sat}}} \right) \quad (2)$$

式中, P 为脉冲的瞬时功率, P_{sat} 是可饱和吸收体的饱和功率, $P_{\text{sat}} = 1500 \text{ W}$, L_0 为调制深度, $L_0 = 0.73$ 。

色散补偿光纤起改变腔内净色散的作用, 可用非线性薛定谔方程表示^[23]:

$$\frac{\partial u(z, T)}{\partial z} = -i \frac{\beta_{\text{DCF},2}}{2} \frac{\partial^2 u(z, T)}{\partial T^2} + i\gamma_{\text{DCF}} |u(z, T)|^2 u(z, T) \quad (3)$$

式中, $\beta_{\text{DCF},2}$ 、 γ_{DCF} 分别为色散补偿光纤对应的 2 阶色散系数和非线性系数, $\beta_{\text{DCF},2} = -130 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\gamma_{\text{DCF}} = 1.3 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

脉冲在 SMF 中的演化不考虑光纤的损耗和高阶色散, 采用非线性薛定谔方程来表示:

$$\frac{\partial u(z, T)}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 u(z, T)}{\partial T^2} = i\gamma |u(z, T)|^2 u(z, T) \quad (4)$$

式中, β_2 为单模光纤的 2 阶色散系数, γ 为单模光纤的非线性系数。对公式进行分步傅里叶法来研究激光器输出脉冲在 SMF 中传输特性。

将(4)式改写成如下形式:

$$\frac{\partial u(z, T)}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N}) u(z, T) \quad (5)$$

式中, \hat{D} 是微分算符, 表示线性介质的色散, \hat{N} 是非线性算符, 决定脉冲传输过程中光纤非线性效应的影响。

$$\hat{D} = -\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial T^2} \quad (6)$$

$$\hat{N} = i\gamma |u(z, T)|^2 \quad (7)$$

1.2 SMF-MZI 的构成及工作原理

MZI 由两种单模光纤组成 (如图 2 所示), 自相似脉冲经过第 1 个耦合器后被分成两个脉冲, 与非线性环形镜不同, 两个分脉冲分别进入不同的物理路径, 通过改变双臂的参数可以破坏 MZI 的平衡, 从而得到自相位调制感应相移, 实现光开关功能。

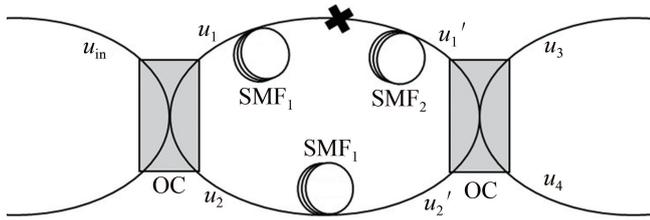


图 2 马赫-曾德尔干涉仪结构图

Fig. 2 MZI structure

本文中设计了一个非对称的 MZI, 输入脉冲经过第 1 个耦合器后进入上下臂的两路脉冲的光信号振幅为 u_1 和 u_2 如下式所示^[24]:

$$u_1 = \sqrt{p_1} u_{in} \quad (8)$$

$$u_2 = i\sqrt{1-p_1} u_{in} \quad (9)$$

式中, p_1 为第 1 个耦合器的功分比, u_{in} 为自相似脉冲包络的慢变振幅。两脉冲在 MZI 中传输并于第 2 个耦合器处发生干涉, 两个输出端口的振幅 u_3 和 u_4 分别为:

$$u_3 = \sqrt{p_2} u_1' + i\sqrt{1-p_2} u_2' \quad (10)$$

$$u_4 = i\sqrt{1-p_2} u_1' + \sqrt{p_2} u_2' \quad (11)$$

式中, u_1' 为上臂输出脉冲的振幅, u_2' 为下臂输出脉冲的振幅, u_3 为输出的压缩脉冲的振幅, u_4 则为脉座的振幅, p_2 为第 2 个耦合器的功分比。

MZI 的上臂采取 SMF 级联的方法, 能够使脉冲在保证峰值功率增大的前提下, 减小脉宽。关于 SMF₁ 和 SMF₂ 的最佳长度选取规则如下: 上臂的脉冲在到达第 2 个耦合器时的脉宽最窄, 峰值功率最高; 下臂的光纤长度要使第 2 个耦合器干涉后输出的脉座最小。

2 数值模拟与分析

2.1 激光器的自相似演化过程

采用低功率的高斯脉冲作为抽运光源, 为了能够

更好地反馈脉冲在自相似激光器中的演化过程, 抽运光源的中心波长采用光纤通信的常用波长。将一个半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 为 2.8 ps、峰值功率为 10^{-10} W 以及中心波长为 1550 nm 的高斯脉冲输入到自相似锁模激光器, 循环 30 圈后获得自相似脉冲输出, 如图 3 所示。

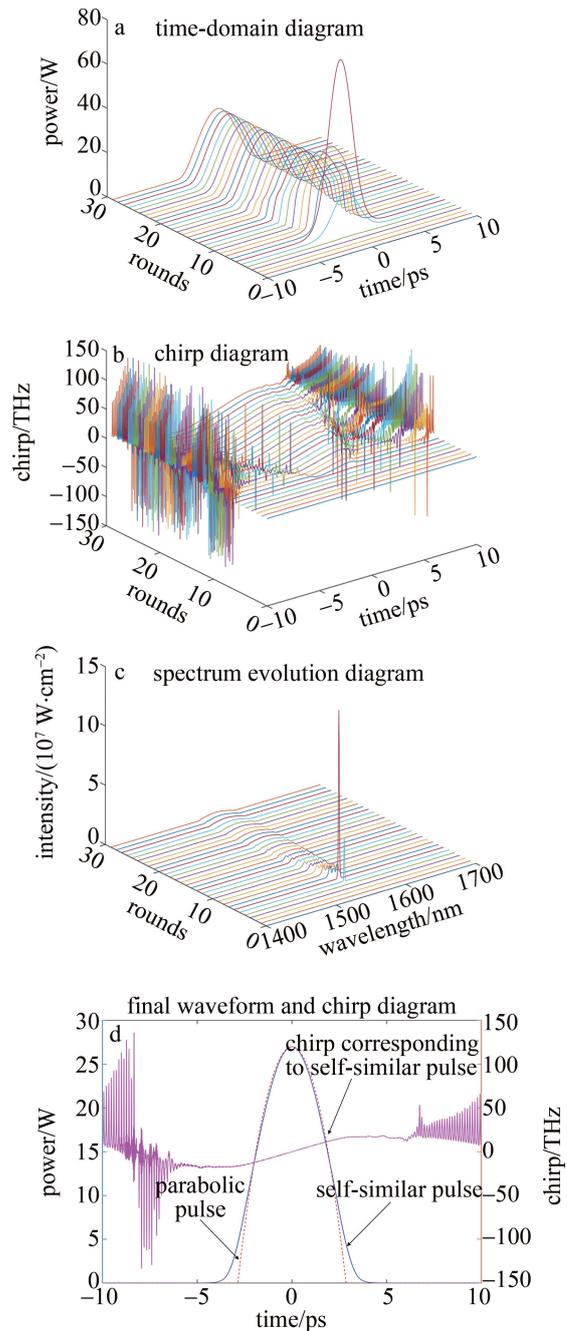


图 3 自相似锁模激光器输出脉冲

Fig. 3 Output pulse of self-similar mode-locked laser

从图 3a 可以看出, 高斯脉冲在激光器的前几圈演化过程中, 由于初始的峰值功率较小, 波形图变化不明显, 随后脉冲峰值功率突然急剧增加后降低, 这是因为

脉冲在循环的过程中受到大量自相位调制感应频率啁啾的作用,较弱的色散效应会引起脉冲整形,整个激光器腔的净色散呈正色散,脉冲展宽,脉冲的前后沿变陡。随着循环次数的增加,脉冲的前后沿逐渐变缓,脉冲趋于稳定,达到自相似锁模脉冲的输出条件。图 3b 所示的啁啾线性部分也是突然减小后增大的过程。从图 3c 脉冲的频谱图可以看出,相比于前 5 圈,第 6 和第 7 圈频谱的强度突然增大,由于入射的高斯脉冲为无啁啾的,随着圈数的增加,自相位调制产生的频率分量展宽了频谱,频谱的振荡峰的个数增加,且最外层的峰的强度最大。在第 21 圈后,从时域图可以看出脉冲波形呈抛物线型,脉冲频谱与脉冲的时域形状相关,振荡的结构变得不明显,最后几圈的频谱趋于一个强度较低且稳定的抛物线型。最终从激光器中获得了峰值功率和半峰全宽分别为 26.9941 W 和 4.044 ps 的自相似脉冲。

进一步引入自相似因子 S 来衡量激光器输出的脉冲是否符合自相似脉冲的演化要求,如下式所示^[25]:

$$S = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |u(z, T)|^2 - |u'(z, T)|^2 dT}{\int_{-\infty}^{\infty} |u'(z, T)|^2 dT} \quad (12)$$

式中, $u(z, T)$ 为数值仿真的激光器输出脉冲的包络振幅, $u'(z, T)$ 为具有与 $u(z, T)$ 相同的峰值功率和半峰全宽的抛物线脉冲。根据多次仿真模拟,当 $S \leq 0.1$ 时,输出脉冲符合自相似脉冲的演化要求。经过计算,输出脉冲的自相似因子为 0.04,符合自相似脉冲的要求。最终输出的自相似脉冲和抛物线脉冲的波形及啁啾如图 3d 所示。

2.2 MZI 压缩部分

采用两种单模光纤来构建 MZI,两种单模光纤的区别在于 2 阶色散的值, SMF_1 和 SMF_2 的 β_2 分别为 $-20 \text{ ps}^2/\text{km}$ 和 $-1.25 \text{ ps}^2/\text{km}$,两个耦合器的功分比均为 0.55。

2.2.1 SMF_1 的最优长度设计 分脉冲 u_1 在上臂上传输是为了获得峰值功率较高和脉宽较窄的压缩脉冲,确定了耦合器的功分比,将 u_1 在 SMF_1 中传输,可以获得传输过程的时域图。如图 4a 所示,脉冲的脉宽随着传输距离的增大而逐渐变窄,峰值功率在 $z=8.16 \text{ m}$ 达到最高后急剧下降。

引入基座能量比例 P_e 来评价脉冲基座的大小,基座能量比例 P_e 是传输脉冲的总能量与双曲正割脉冲总能量的相对差值,双曲正割脉冲是与输出脉冲具有

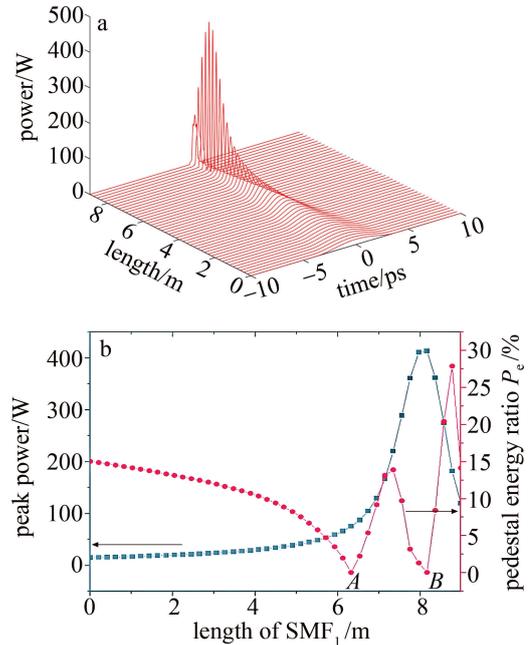


图 4 a— SMF_1 的时域演化图 b—峰值功率和基座能量曲线图
Fig. 4 a—time domain evolution diagram of SMF_1 b—peak power and pedestal energy curve

相同峰值功率和的无基座脉冲。基座能量比例的表达式如下式所示^[26]:

$$P_e (\%) = \frac{|E_{\text{total}} - E_{\text{sech}}|}{E_{\text{total}}} \times 100\% \quad (13)$$

式中, $E_{\text{sech}} = 2P_{\text{peak}} T_{\text{FWHM}}/1.763$ 代表双曲正割脉冲能量, P_{peak} 为双曲正割脉冲的峰值功率, T_{FWHM} 表示双曲正割脉冲的半峰全宽, E_{total} 是一个常量,代表传输脉冲的总能量。经计算,锁模激光器输出的自相似脉冲的基座能量比例为 15.0354%,当脉冲的总能量越接近双曲正割脉冲时, P_e 越小,说明输出脉冲得到基座能量越小。

从图 4b 可以看出,脉冲的峰值功率随着传输距离的增加而增大,基座能量比例曲线存在两个极小值,分别是 0.0431% (在 6.324 m 处) 和 0.0543% (在 8.160 m 处),针对这两个点 (A 和 B) 来讨论脉冲后续在 SMF_2 的传输特性。

将这两个脉冲传输到足够长的 SMF_2 中,脉冲的时域图如图 5 所示。红色虚线和黑色实线区域分别为脉冲在 SMF_1 和 SMF_2 中的演化过程,两组脉冲在 SMF_2 的峰值功率呈现周期性地增大后减小的趋势,关于两组脉冲在 SMF_2 的峰值功率最高处的数据如表 1 所示。相比于极小值点 A,极小值点 B 达到其最大峰值功率所需的 SMF_2 更短,脉宽更窄,基座能量比例更小,脉冲的整体质量更高,更有利于后期输出压缩脉冲。

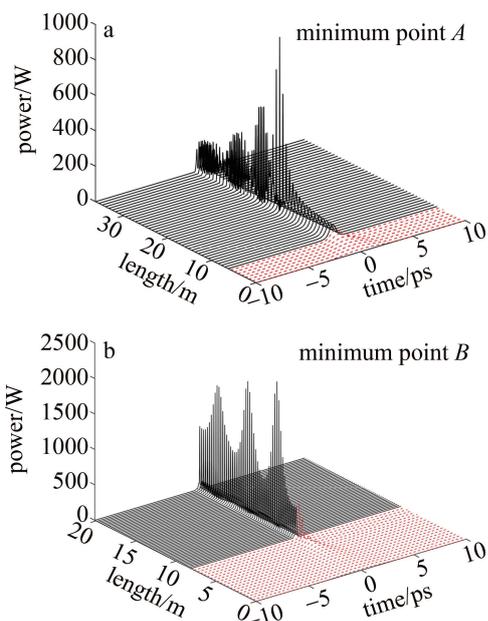


图 5 SMF₂ 的时域图

Fig. 5 Time-domain diagram of SMF₂

表 1 极小值点 A 和 B 对应的光纤长度和输出脉冲的参数

Table 1 Optical fiber length and output pulse parameters corresponding to minimum points A and B

minimum point	A	B
length of SMF ₁ /m	6.324	8.160
peak power P ₁ /W	75.2949	413.1303
FWHM/fs	346.9	126.3
P _e /%	0.0431	0.0543
length of SMF ₂ /m	12.000	2.160
peak power P ₂ /W	981.63	1969.74
FWHM/fs	30.9	22.5
P _e /%	41.76	15.0896

2.2.2 SMF₂ 的长度变化对压缩脉冲的影响 为了得到质量更高的压缩脉冲,在保持耦合器功分比不变以及上下臂的 SMF₁ 长度保持一致的前提下,调整 SMF₂ 的长度,观察在特定光纤长度内脉冲参数的变化。已知脉冲在 SMF₂ 的传输过程如图 5b 所示,脉冲演化过程中最大峰值功率出现在 z = 2.160 m 处,选取 1.296 m ~ 3.024 m 区间的 SMF₂ 长度来分析 SMF₂ 对后期输出压缩脉冲的影响。表 2 中为在 SMF₂ 的区间均等分所选取的数据点,便于分析各个点对应脉冲的差异。

表 2 数据点所对应的 SMF₂ 长度

Table 2 SMF₂ length corresponding to the data point

data point	1	2	3	4	5	6	7	8	9
length of SMF ₂ /m	1.296	1.512	1.728	1.944	2.160	2.376	2.592	2.808	3.024

图 6a 显示了对应 SMF₂ 长度 u₁' 和 u₃ 的峰值功率

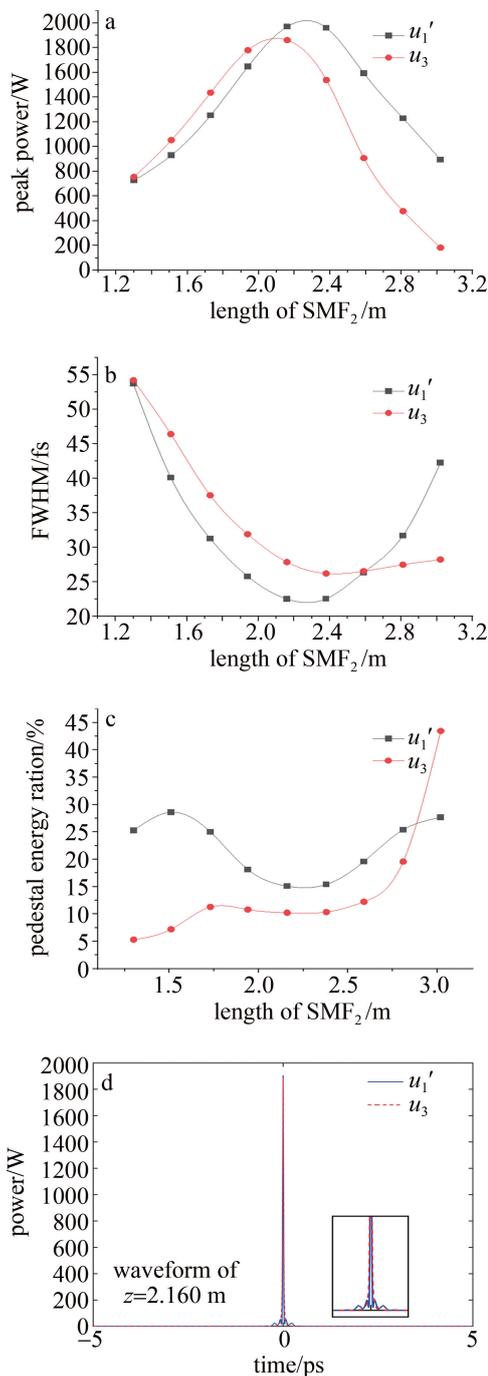


图 6 上臂的输出脉冲与压缩脉冲

Fig. 6 Output pulse and compression pulse of upper arm

大小。通过对比 SMF₂ 的输出脉冲 u₁' 和最终获得的压缩脉冲 u₃,两个脉冲峰值功率曲线都是先增大后减小的走势,可以发现,在 2.160 m (即第 6 个数据点)前,压缩脉冲的峰值功率要高于上臂的输出脉冲,2.160 m 之后压缩脉冲的峰值功率降低至 200 W 以下。如图 6b 所示,从 u₁' 的演化趋势可以看出,在随着光纤长度的增加,脉冲先被压缩后展宽,与峰值功率曲

线的演化趋势相反,在 2.592 m 前,压缩脉冲的脉宽要大于 u_1' ,这是因为下臂的输出脉冲脉宽较大,两个脉冲相互干涉后,脉冲的基座部分通过干涉相消的方法去除,脉冲的中央部分干涉相长。图 6c 为基座能量比例曲线。表明了压缩脉冲的基座明显比未干涉前要小,且两条曲线的差值从较大变为较小,在 2.160 m 前,上臂的脉冲峰值功率增大的同时基座能量比例减小,前 6 个数据点的压缩脉冲能够保持在 10.5% 以下。

用压缩品质因子 Q 来综合评价压缩脉冲质量^[27]:

$$Q = \frac{R}{F} = \frac{P_{\text{out}} T_0}{P_{\text{in}} T_{\text{out}}} \quad (14)$$

式中,品质因子 R 是输出脉冲与输入脉冲的峰值功率比, P_{in} 为上臂输入脉冲的峰值功率, P_{out} 为压缩脉冲的峰值功率,压缩因子 F 是输出脉冲与输入脉冲半峰全宽的比值, T_{out} 为压缩脉冲的半峰全宽, T_0 为上臂输入脉冲的半峰全宽, Q 越大,压缩效果越好。

从图 7 中可以看出,脉冲的压缩品质因子曲线存在极大值,位于光纤长度 2.16 m 处,因此,该长度的 SMF₂ 经过耦合器干涉后输出的脉冲压缩效果最好。

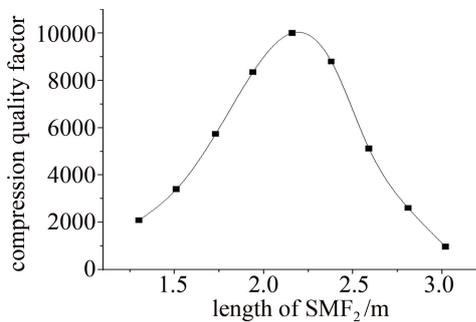


图 7 不同 SMF₂ 长度对应的压缩品质因子曲线

Fig. 7 Compression quality factor curves corresponding to different SMF₂ lengths

2.2.3 高阶色散对压缩脉冲的影响 输入脉冲在单模光纤中传输存在脉宽小于 1 ps 的情况,即使 $\beta_2 \neq 0$,也必须包含 β_3 项,这是因为参量 $\Delta\omega/\omega_0$ ($\Delta\omega$ 为谱宽, ω_0 为中心频率) 没有足够小到可把 β_3 项简而化之。脉冲在 SMF 中传输特性用包含 3 阶色散的非线性薛定谔方程表示:

$$\frac{\partial u(z, T)}{\partial z} = -\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 u(z, T)}{\partial T^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 u(z, T)}{\partial T^3} + i\gamma |u(z, T)|^2 u(z, T) \quad (15)$$

式中, β_3 为 3 阶色散系数,等号的右侧分别代表着 2 阶色散、3 阶色散和非线性效应。取 3 阶色散系数为 0.01 ps³/km,图 8 为考虑 3 阶色散的上臂脉冲演化的

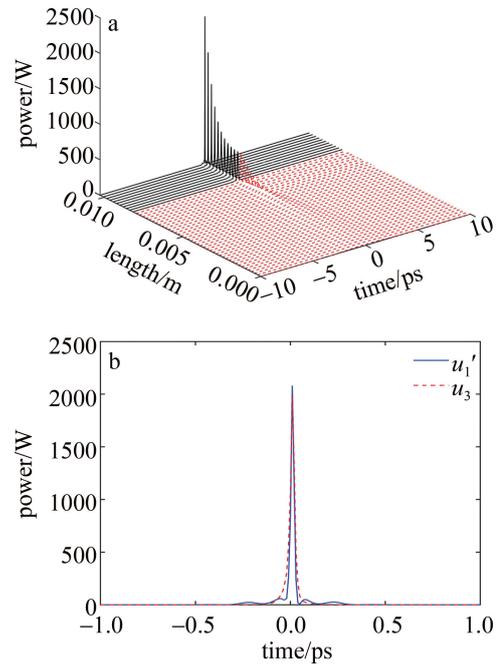


图 8 a—上臂的输出时域图 b—输出脉冲与压缩脉冲的波形图

Fig. 8 a—output time-domain diagram of the upper arm b—waveform diagram of output pulse and compression pulse

时域波形图和上臂输出脉冲与压缩脉冲的对比波形图。

从图 8a 可以看出,脉冲的峰值功率相比于只考虑 2 阶色散有所提升,但是 3 阶色散效应会使脉冲的波形不再对称,且产生带有振荡结构的拖尾。从基座上分析,SMF₁ 段输出脉冲的基座能量比例仅为 0.1104%,在 SMF₂ 中压缩,基座能量比例增长至 2.9114%,通过耦合器的干涉作用,上下臂的脉冲相互干涉,最后输出的压缩脉冲的基座能量比例高达 17.653%,干涉仪没有达到减小基座的要求。这是因为脉冲的 3 阶色散给脉冲带来位移,上下臂的输出脉冲中心不在同一直线上,从压缩脉冲的波形图可以得知脉冲的前沿变缓,后沿的基座得到有效的消除。

以 0.001 ps³/km 为步长,将 3 阶色散系数从 0 取到 0.01 ps³/km,对应的压缩脉冲的峰值功率、半峰全宽以及基座能量比例曲线如图 9 所示。3 阶色散系数的增大对压缩脉冲的峰值功率增长有一定程度的抑制。半峰全宽曲线在 3 阶色散系数较小时呈现较缓的增长,当 3 阶色散系数大于 0.004 ps³/km 时,脉宽不断减小。基座能量比例曲线的最低点出现在 0.001 ps³/km 处,随着 3 阶色散系数的增大,曲线出现小范围的减小,但基座能量比例均大于 11%,为了减少 3 阶色散对压缩脉冲的影响,3 阶色散系数应小于 0.001 ps³/km。

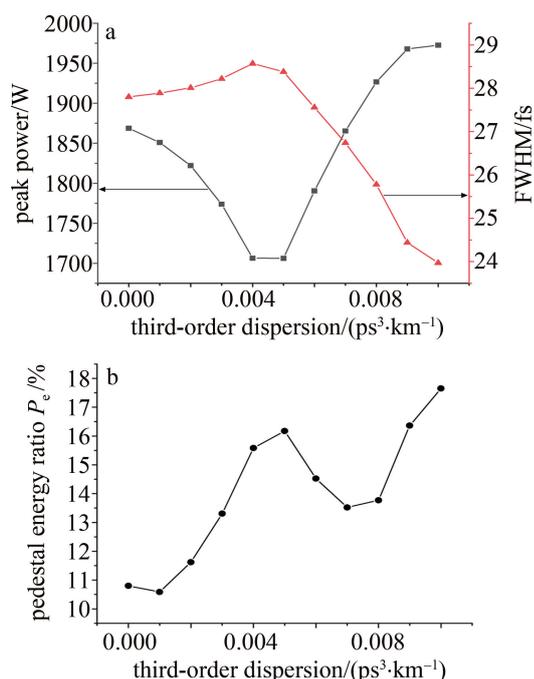


图 9 不同 3 阶色散系数下压缩脉冲有关参数曲线

Fig. 9 Curve of compression pulse parameters with different third-order dispersion coefficients

3 结论

基于分步傅里叶法对非线性薛定谔方程进行求解,并且建立自相似锁模激光器和马赫-曾德尔干涉仪的数值模型,研究了自相似脉冲在马赫-曾德尔干涉仪的传输特性。研究表明,上臂采取级联单模光纤的方式可以获得峰值功率较高的脉冲,上下臂的输出脉冲通过耦合器后脉冲中央部分干涉相长,基座部分干涉相消,最后获得一个峰值功率高、基座能量比例小的超短脉冲。上臂两段单模光纤的优化设计主要是通过分析脉冲在不同长度的峰值功率、半峰全宽和基座能量比例,确定第 1 段单模光纤的长度为 8.16 m,结合压缩品质因子,第 2 段单模光纤的长度为 2.16 m 时的压缩品质因子最好。在光纤传输过程中,高阶色散会影响脉冲的形状畸变,数值仿真发现脉冲右移,脉冲非对称并伴随着前后沿振荡,上臂的脉冲在传输过程中基座能量一直处于增大的趋势,最后耦合器输出的压缩脉冲的基座能量比例高达 17.653%。研究表明,高阶色散较大会影响脉冲压缩质量,当 3 阶色散系数小于 $0.001 \text{ ps}^3/\text{km}$ 时,能输出质量较好的压缩脉冲。

参考文献

[1] SHAH L, FERMAN M. High-power ultrashort-pulse fiber amplifiers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 552-558.

[2] WANG J, LI J Zh, WEN W F, *et al.* Precisely measuring for optical pulse time delay using autocorrelation [J]. Chinese Optics, 2015, 8(2): 270-276 (in Chinese).
王竞, 李建中, 温伟峰, 等. 利用自相关方法实现光脉冲时间延迟精确测量[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 270-276.

[3] XIA Zh Y, QIAN J, WANG G D, *et al.* Research progress on ultra-short pulsed laser processing of metallic glasses [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(15): 1516027 (in Chinese).
夏照远, 钱静, 王关德, 等. 超短脉冲激光加工金属玻璃研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(15): 1516027.

[4] ZOU G Sh, LIN L Ch, XIAO Y, *et al.* Ultrafast laser nanojoining and its applications in the manufacturing of micro-nano devices [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1502001 (in Chinese).
邹贵生, 林路禅, 肖宇, 等. 超快激光纳米连接及其在微纳器件制造中的应用[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1502001.

[5] LIU Y X, ZHANG R K, WANG H, *et al.* 25 GHz semiconductor mode-locked laser with subpicosecond pulse output in the 1.5 μm band (Invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(2): 0251211 (in Chinese).
刘宇翔, 张瑞康, 王欢, 等. 1.5- μm 波段 25-GHz 重频亚皮秒脉冲输出半导体锁模激光器 (特邀) [J]. 光子学报, 2022, 51(2): 0251211.

[6] SALTARELLI F, GRAUMANN I J, LANG L, *et al.* Power scaling of ultrafast oscillators: 350-W average-power sub-picosecond thin-disk laser [J]. Optics Express, 2019, 27(22): 31465.

[7] MULLER M, ALESHIRE C, KLENKE A, *et al.* 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser [J]. Optics Letters, 2020, 45(11): 3083-3086.

[8] WANG W, WU H, LIU C, *et al.* Multigigawatt 50 fs Yb:CALGO regenerative amplifier system with 11 W average power and mid-infrared generation [J]. Photonics Research, 2021, 9(8): 1439-1445.

[9] MENG Y, ZHANG S, JIN C, *et al.* Enhanced compression of femtosecond pulse in hollow-core photonic bandgap fibers [J]. Optics Communications, 2010, 283(11): 2411-2415.

[10] LI Q, HUANG H. Effective pulse compression in dispersion decreasing and nonlinearity increasing fibers [J]. Optics Communications, 2015, 342: 36-43.

[11] YE F, HUANG J, GANDHI M S A, *et al.* Nearly self-similar pulse compression of high-repetition-rate pulse trains in tapered silicon waveguides [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(14): 4717-4724.

[12] YU T, LIU X, PRYAMIKOV A, *et al.* Femtosecond pulse compression with pedestal suppression in a sagnac interferometer constructed of anti-resonant hollow core fiber [J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(2): 1-9.

[13] LI M L, ZHANG Q F, SHI Sh D. Design of self-similar pulse compression fiber based on chirp compensation technology [J]. Laser Technology, 2021, 45(5): 566-570 (in Chinese).
李沐霖, 张巧芬, 史圣达. 基于啁啾补偿技术的自相似脉冲压缩光纤设计[J]. 激光技术, 2021, 45(5): 566-570.

[14] ZHAO Y, LIU Y Zh, ZHAO D Sh, *et al.* Evolution of mode-locked technology of fiber lasers [J]. Laser Technology, 2009, 33(2): 162-165 (in Chinese).
赵羽, 刘永智, 赵德双, 等. 光纤激光器锁模技术研究进展[J]. 激光技术, 2009, 33(2): 162-165.

[15] WANG F, LI Q. Cascaded single mode fibers for higher-order soliton

- compression at 2 μm [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(17): E17-E22.
- [16] XU Y Zh, ZHANG G, YE H, *et al.* Effect of initial frequency chirp on pulse compression of higher-order solitons in cascaded single-mode fibers [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(11): 1360-1366 (in Chinese).
徐永钊, 张耿, 叶海, 等. 级联单模光纤中初始啁啾对高阶孤子脉冲压缩的影响 [J]. *发光学报*, 2016, 37(11): 1360-1366.
- [17] CAO W H, XU P, LIU S H, *et al.* Soliton-effect pulse compression in a dispersion-decreasing fiber-based Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0419001 (in Chinese).
曹文华, 徐平, 刘颂豪, 等. 马赫-曾德尔型色散渐减光纤干涉仪的孤子效应脉冲压缩研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0419001.
- [18] FERMAN M E, KRUGLOV V I, THOMSEN B C, *et al.* Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(26): 6010-6013.
- [19] ZHANG Q F, DENG Y H. Influence of gain coefficient on the self-similar pulses propagation in a dispersion-decreasing fiber [J]. *Optik*, 2016, 127(12): 5110-5114.
- [20] ZHANG Q F. Investigation on generalized analytical solution of similariton chirp in different tapered DDF and NIF [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53(1): 54.
- [21] WANG X D, ZHOU Zh, LI S W, *et al.* Self-similar pulse evolution in ytterbium doped fiber amplifiers [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(1): 8-12 (in Chinese).
汪徐德, 周正, 李素文, 等. 掺镱光纤放大器中脉冲自相似演化特性分析 [J]. *激光技术*, 2012, 36(1): 8-12.
- [22] DU Y, SHU X. Transformation from conventional dissipative solitons to amplifier similaritons in all-normal dispersion mode-locked fiber lasers [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 1-11.
- [23] HIROOKA T, NAKAZAWA M. Parabolic pulse generation by use of a dispersion-decreasing fiber with normal group-velocity dispersion [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(5): 498-500.
- [24] DORAN N J, WOOD D. Nonlinear-optical loop mirror [J]. *Optics Letters*, 1988, 13(1): 53-58.
- [25] ZHANG Q F, LI H, WU L M, *et al.* Research on evolution region of self-similar pulses in a dispersion-decreasing fiber [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, 51(6): 190.
- [26] CAO W H, WAI P K. Picosecond soliton transmission by use of concatenated gain-distributed nonlinear amplifying fiber loop mirrors [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(35): 7611-7620.
- [27] LI M L, ZHANG Q F, SHI Sh D, *et al.* Design of self-similar pulse compression grating pair based on chirp compensation [J]. *Study on Optical Communications*, 2021(4): 56-60 (in Chinese).
李沐霖, 张巧芬, 史圣达, 等. 基于啁啾补偿的自相似脉冲压缩光栅对的设计 [J]. *光通信研究*, 2021(4): 56-60.