

光纤激光器中类噪声脉冲自相关的数值研究

金鑫鑫 李雷 罗娇林 葛颜琦 张倩 赵鹭明

江苏师范大学物理与电子工程学院江苏省先进激光材料与器件重点实验室, 江苏 徐州 221116

摘要 采用数值分析的方法研究了光纤激光器中类噪声脉冲的自相关特性。数值计算的结果复现了实验中观测到的类噪声自相关曲线图形。进一步改变类噪声脉冲各参量设置,发现无背景强度自相关曲线的基底和尖峰的宽度分别反映了类噪声脉冲波包的宽度以及类噪声脉冲波包中超短脉冲的平均脉宽。相同的类噪声脉冲波包中超短脉冲的个数越多,无背景强度自相关曲线的尖峰与基底的峰值比越小,尖峰与基底的宽度则不受影响。对类噪声脉冲干涉自相关曲线的数值研究结果表明,实验中测量得到的峰值背景比小于8:1的干涉自相关曲线,是类噪声脉冲波包宽度、类噪声脉冲啁啾、自相关仪扫描范围共同影响的结果。

关键词 非线性光学;类噪声脉冲;二阶自相关;光纤激光器;数值模拟

中图分类号 O437 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.121902

Numerical Study on Autocorrelation of Noise-Like Pulse in Fiber Lasers

Jin Xinxin Li Lei Luo Jiaolin Ge Yanqi Zhang Qian Zhao Luming

Jiangsu Key Laboratory of Advanced Laser Materials and Devices, School of Physics and Electronic Engineering,
Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

Abstract The autocorrelation characteristics of the noise-like pulse generated from fiber laser are investigated using numerical analysis. Numerically calculated autocorrelation traces agree with experimental results. By changing the parameters, it is found that the pedestal and the spike reflect the average pulse width and intra-pulse width, respectively. Increasing intra-pulse number in a noise-like pulse leads to a smaller spike-to-pedestal intensity ratio, while the width of the pedestal and the spike are not obviously influenced. Numerical analyses show that the contrast ratio of the interferometric autocorrelation trace less than 8:1, which is detected in experiment, is determined by the noise-like pulse width, pulse chirp and scan range.

Key words nonlinear optics; noise-like pulse; second order autocorrelation; fiber lasers; numerical simulation

OCIS codes 190.5530; 140.3510; 060.5530; 060.4370

1 引言

作为一种结构简单、紧凑的超短脉冲源,被动锁模光纤激光器已受到广泛关注^[1-2]。除了能产生稳定的锁模超短脉冲外,光纤激光器还能工作在一种特殊的锁模状态,即“类噪声”脉冲。类噪声脉冲的典型特征:1) 1个宽的波包,波包内部具有脉冲宽度和脉冲峰值功率随机变化的飞秒脉冲结构;2) 宽而平滑的光谱(平均效果);3) 低时域相干性。类噪声脉冲的脉冲宽度(波包宽度)一般由抽运功率决定,可以从皮秒变化至纳秒量级。Horowitz等^[3]首次在被动锁模掺铒光纤激光器中发现并报道了类噪声锁模脉冲。随后的研究表明,光纤激光器在不同的色散区^[4-8],不同的波段^[4-7],或利用不同的锁模机制^[4-6,8-9]均能产生类噪声锁模脉冲。因此,类噪声脉冲是被动锁模光纤激光器中普遍存在的状态。类噪声脉冲首先能够继承光纤激光器光束质量好、增益高、结构紧凑、散热性好等优点。与传统的稳定锁模脉冲相比,类噪声脉冲更易获得大能量,经过简单的1级放大,大能量的“类噪声”脉冲不仅可以有效地用于机械加工^[10],还能作为抽运源产生超连续光

收稿日期: 2015-05-29; 收到修改稿日期: 2015-06-21; 网络出版日期: 2015-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(61275109)、江苏省高校优势学科建设工程、江苏省自然科学基金(BK20140231)、江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX_1427)

作者简介: 金鑫鑫(1991—),男,硕士研究生,主要从事锁模光纤激光器方面的研究。E-mail: vgcygegc@qq.com

导师简介: 赵鹭明(1976—),男,博士,教授,主要从事锁模光纤激光器、光纤放大器、光孤子动力学等方面的研究。

E-mail: zhaoluming@jsnu.edu.cn(通信联系人)

谱^[11]。由于“类噪声”脉冲具有低相干性,可用于光学相干断层扫描技术(OCT)中^[12]。OCT已经在临床诊疗与科学研究中获得了广泛的应用。2014年,Lecaplain等^[13]发现类噪声脉冲与怪波之间可能存在关联。这成为基础物理研究的一个热点。因此,类噪声脉冲不论是在基础物理研究方面,还是在应用方面都具有极大的研究价值。

采用二阶自相关法测量脉冲宽度是脉冲时域测量的常规手段。对于传统的锁模超短脉冲自相关曲线特性,理论上已有大量的研究^[14-17]。而类噪声脉冲的自相关曲线表现出了不同于传统锁模孤子的自相关曲线特征^[3-9]:其无背景强度自相关曲线表现为皮秒到纳秒量级的基底,在基底的顶部则是飞秒量级的尖峰,尖峰和基底的高度比接近1:1。相比较传统锁模脉冲的自相关图形只提供了一个脉宽信息,类噪声脉冲的无背景强度自相关曲线提供了基底、尖峰两个脉宽信息以及尖峰和基底的高度比信息。能否通过这些信息更全面的了解类噪声脉冲特性显得尤为重要。然而由于类噪声脉冲波包内部是脉冲宽度和脉冲峰值功率随机变化的飞秒脉冲结构,对于其自相关曲线很难获得解析结果。因此本文采用数值模拟的方法,探究类噪声脉冲的自相关曲线与类噪声脉冲自身各参量的关系,分析类噪声脉冲无背景强度自相关曲线所蕴含的信息。此外,2011年以来也有文献给出了实验中测得的类噪声脉冲干涉自相关曲线^[13,18],其特征是峰值与背景的比例偏离了传统自相关曲线的8:1。本文将通过数值分析对这一现象进行研究。

2 非线性自相关

自相关仪原理如图1所示,自相关仪以一台迈克耳孙干涉仪为基础,入射脉冲被分束镜分成两束光 E_1 和 E_2 ,通过延时装置在两束光之间引入可变光延迟 τ ,形成延迟光 $E_2(t-\tau) = \varepsilon(t-\tau)\exp\{-i[\omega(t-\tau) - \varphi(t-\tau)]\}$ 对另一束光 $E_1(t) = \varepsilon(t)\exp\{-i[\omega t - \varphi(t)]\}$ 的扫描,其中 ε 为电场包络振幅, ω 为光频率, φ 是电场相位。两束光合并聚焦在倍频晶体上产生二阶非线性响应信号,此信号正比于脉冲的相关信号^[17]。

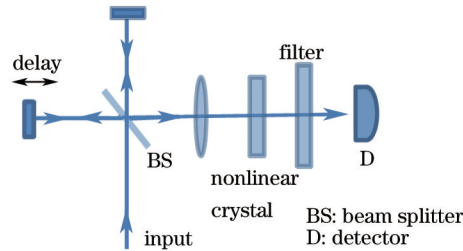


图1 自相关仪原理示意图

Fig.1 Setup of an autocorrelator

探测器探测到的相关信号 $S(\tau)$ 可以表示为^[19]

$$S(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \{ [E_1(t) + E_2(t-\tau)] [E_1(t) + E_2(t-\tau)]^* \}^2 dt, \quad (1)$$

展开后得到

$$S(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} [\varepsilon^4(t) + \varepsilon^4(t-\tau)] dt + 4 \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon^2(t)\varepsilon^2(t-\tau) dt + 2 \int_{-\infty}^{+\infty} [\varepsilon^2(t) + \varepsilon^2(t-\tau)] \varepsilon(t)\varepsilon(t-\tau) \{ \exp\{-i[\omega\tau - \varphi(t-\tau) + \varphi(t)]\} + \exp\{i[\omega\tau - \varphi(t-\tau) + \varphi(t)]\} \} dt + \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon^2(t)\varepsilon^2(t-\tau) \{ \exp\{-2i[\omega\tau - \varphi(t-\tau) + \varphi(t)]\} + \exp\{2i[\omega\tau - \varphi(t-\tau) + \varphi(t)]\} \} dt$$

展开式中的第1个积分项与延迟时间 τ 无关,是单束光自己的倍频信号,称为背景。第2个积分项为强度相关项。第3个积分项和第4个积分项是带有光频的相位相干项。数值模拟时令4个积分项依次等于A、B、C、D。因此数值模拟中的自相关函数 S 是直流背景项A、强度相关项B、相位相干项C和D的和。

3 类噪声脉冲自相关曲线特性

类噪声脉冲的时域特征是1个宽的波包,波包内部具有脉冲宽度和脉冲峰值功率随机变化的飞秒脉冲结构。根据类噪声脉冲的特征,数值模拟时设置的类噪声脉冲的特性取决于以下几个参量:1)类噪声脉冲波包的宽度 T_w ; 2)类噪声脉冲波包中每个超短脉冲的随机强度 P^2 ; 3)类噪声脉冲波包中每个超短脉冲的

随机脉宽 T_0 , 数值计算中记录了类噪声脉冲波包中所有超短脉冲随机脉宽 T_0 的和, 并求得平均脉宽 T_w ; 4) 类噪声脉冲波包中超短脉冲个数, 在计算中由参量 R 决定, R 表示脉冲波包中两个超短脉冲之间的距离。设置 R 与前一个超短脉冲脉宽的随机关系, 使脉冲波包中每两个脉冲之间的距离是随机的, 但是大量超短脉冲之间的距离是有规律的。 T_w 一定的情况下, 参量 R 的平均值越小, 超短脉冲之间越紧密, 类噪声脉冲波包中的超短脉冲个数越多, 相邻脉冲之间有重叠的概率也越大。

3.1 强度自相关曲线

程序中类噪声脉冲时域窗口的大小为 16 ps, 采样点数为 2048。设置类噪声脉冲为双曲正割型, 其他参量值如下: 脉冲波包宽度 $T_w = 12$ ps; 类噪声脉冲波包中每个超短脉冲的电场振幅 P 随机产生于 3~6 之间; 类噪声脉冲波包中每个超短脉冲的脉宽 T_0 随机产生于 0~300 fs 之间; R 随机产生于 $0 \sim 2T_0$, 如图 2 所示。

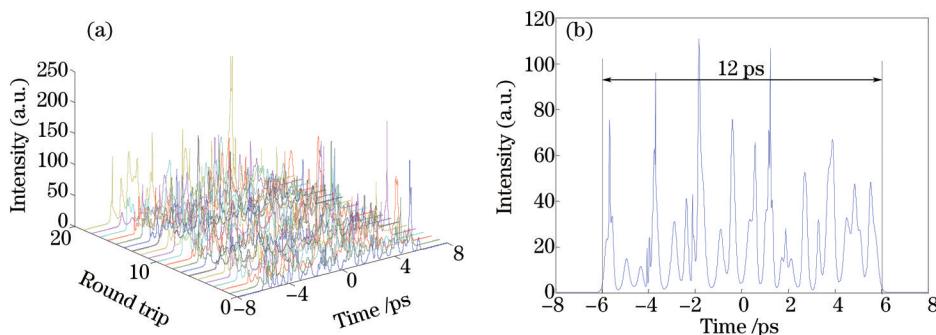


图 2 设置的类噪声脉冲。(a) 20 圈; (b) 1 圈

Fig.2 Bunched noise-like pulses. (a) 20 rounds; (b) 1 round;

对于无背景强度自相关, 自相关信号是强度干涉的结果, 因此数值计算中自相关函数 $S=B$ 。图 3(a) 的蓝色实线是计算类噪声脉冲强度自相关 100 圈平均的结果, 自相关图形表现为在皮秒量级的基底上, 有飞秒量级的尖峰。尖峰和基底的峰值比接近于 1:1。这与实验中观测到的自相关曲线特性符合的很好。

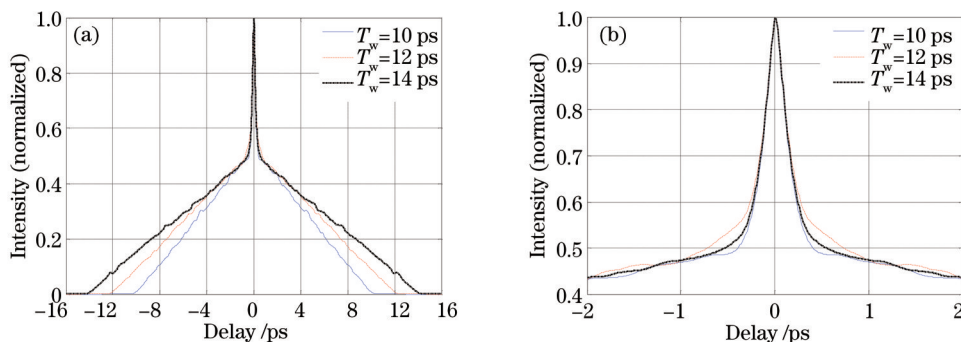


图 3 不同 T_w 值的无背景自相关曲线。(a) 32 ps 扫描窗口; (b) 尖峰

Fig.3 Background free autocorrelation trace with different T_w . (a) 32 ps scan range; (b) peak

保持类噪声脉冲的其他参数不变, 仅仅改变类噪声脉冲波包的宽度参量 T_w , 使其分别等于 10、12、14 ps, 计算自相关曲线如图 3 所示。随着类噪声脉冲波包宽度的增加, 自相关曲线的基底宽度随之增加, 对应半峰全宽分别为 10.6、12.9、14.8 ps。而尖峰的半峰全宽以及尖峰与基底的峰值比基本没有变化。因此类噪声脉冲自相关曲线的基底宽度反映了类噪声脉冲波包的宽度。

保持类噪声脉冲的其他参数不变, 仅仅改变类噪声脉冲中每个超短脉冲的随机脉宽 T_0 的范围, 使其分别产生于 0~100、0~200、0~300 fs。所得超短脉冲的平均脉宽 T_w 分别为 49.9、100.5、151.8 fs。计算其无背景强度自相关曲线如图 4 所示。随着类噪声脉冲波包中超短脉冲平均宽度的增加, 基底宽度以及尖峰与基底的峰值比基本没有变化。放大的尖峰自相关曲线图显示, 尖峰宽度随着 T_w 的增大而增大。对尖峰采用双曲正割曲线拟合时, 计算转换得到的尖峰宽度分别为 55.7、106.3、162.0 fs, 约等于类噪声脉冲波包中超短脉冲的平均脉宽。因此类噪声脉冲自相关曲线的尖峰宽度反映了类噪声脉冲波包中超短脉冲的平均宽度。

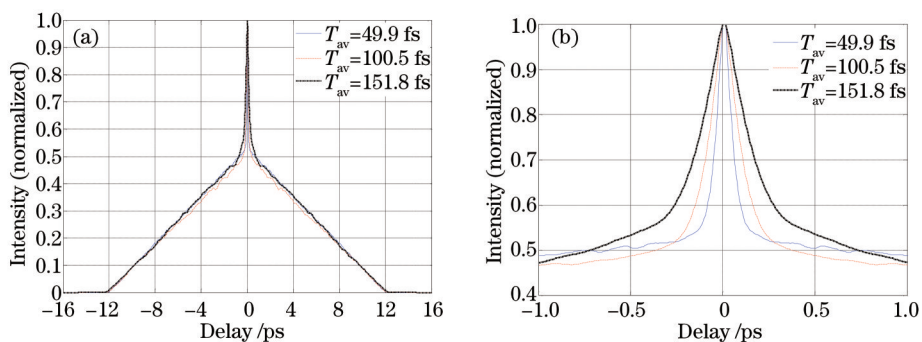


图4 不同 T_{av} 值的无背景自相关曲线。(a) 32 ps 扫描窗口; (b) 尖峰

Fig.4 Background free autocorrelation trace with different T_{av} . (a) 32 ps scan range; (b) peak

为了探究类噪声脉冲波包中超短脉冲平均脉宽一定的情况下脉冲个数对自相关曲线的影响,保持其他参量一致,设置不同的 R 使其分别随机产生在 $0 \sim 4T_0$, $0 \sim 3T_0$, $0 \sim 2T_0$ 。因此在同样的波包内,超短脉冲的平均脉宽一定但是脉冲个数随着 R 值的减小而增多。数值计算其强度自相关曲线如图5所示,随着脉冲个数的增多,强度自相关曲线的基底峰值变大。因此,可以从自相关曲线基底与尖峰的比值变化获得类噪声脉冲波包中超短脉冲紧密程度变化的信息。但是脉冲个数的变化并没有明显影响基底和尖峰的半峰全宽。

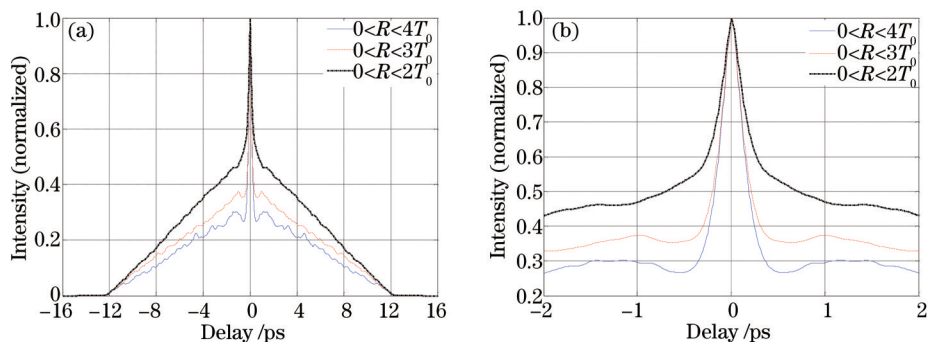


图5 不同 R 值的无背景自相关曲线。(a) 32 ps 扫描窗口; (b) 尖峰

Fig.5 Background free autocorrelation trace with different R . (a) 32 ps scan range; (b) peak

如果考虑类噪声脉冲波包是双曲正割型,既分布在计算窗口的类噪声脉冲电场受到双曲正割型包

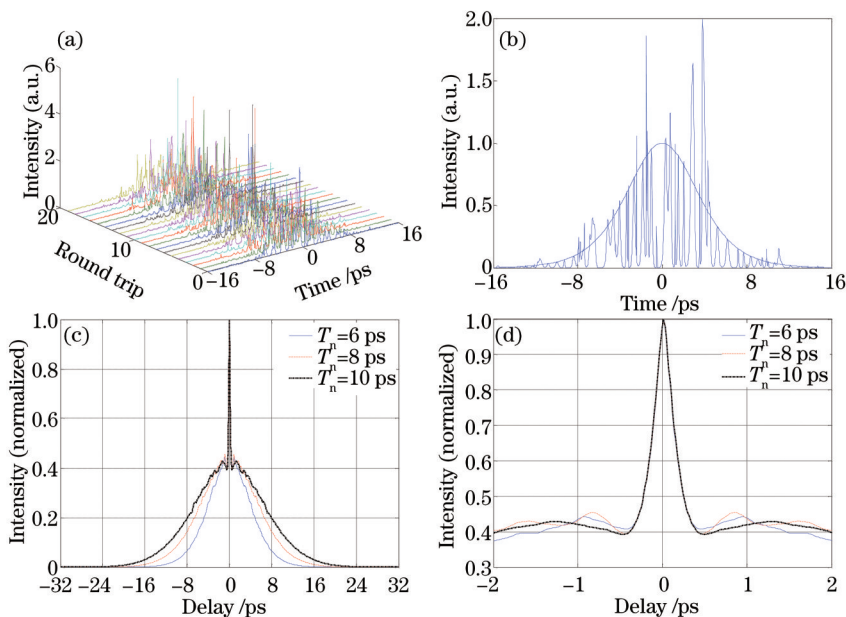


图6 类噪声脉冲波包及不同 T_n 值无背景自相关曲线。(a) 20圈; (b) 1圈; (c) 32 ps 扫描窗口; (d) 尖峰

Fig.6 Bunched noise-like pulse and background free autocorrelation trace with different T_n . (a) 20 rounds; (b) 1 round; (c) 32 ps scan range; (d) peak

络的调制,则类噪声脉冲波包的宽度 T_w 和振幅 P 都将由双曲正割型包络的半峰全宽 T_n 决定。图 6(a)和 (b)所示是时域窗口为 32 ps, 采样点为 2048, T_n 等于 8 ps 时的类噪声脉冲图形。图 6(c)和 (d)是其他参量相同, 对应不同 T_n 计算得到的自相关曲线。

可以看到,随着类噪声脉冲波包宽度的增加,自相关曲线的基底宽度也相应增加。与图 3~5 所示的自相关曲线相比,图 6 自相关曲线基底的形状有了明显的变化。对基底采用双曲正割曲线拟合,计算转换得到的基底半峰全宽分别为 5.8、7.9、9.8 ps,约等于所设置的脉冲波包包络半峰全宽。因此类噪声脉冲自相关曲线的基底不仅给出类噪声脉冲波包的宽度信息,其形状也反映了类噪声脉冲波包包络的形状。这说明不同文献中类噪声脉冲自相关曲线基底的形状的较大差异,是由类噪声脉冲本身波包包络的决定的。

3.2 干涉自相关曲线

干涉自相关曲线由于含有与光频率有关的相位相干项,因此可以揭示脉冲中相位的信息。在数值模拟中,干涉自相关函数是直流背景项、强度相干项、相位相干项的和,即自相关函数 $S=A+B+C+D$ 。类噪声脉冲时域窗口大小为 16 ps, 采样点数为 16384。令脉冲波包宽度 $T_w=6$ ps, 类噪声脉冲波包中每个超短脉冲的电场振幅 P 随机产生于 0~10, 类噪声脉冲波包中每个超短脉冲的脉宽 T_0 随机产生于 0~300 fs, $R=2T_0$, 脉冲的中心波长为 1550 nm。因为干涉自相关函数包含脉冲的相位信息,因此在数值计算中引入脉冲啁啾。模拟中自相关扫描窗口大小为 32 ps。当类噪声脉冲波包不含啁啾,计算干涉自相关曲线如图 7(a)所示。自相关曲线峰值与背景的比例并没有偏离 8:1, 在皮秒量级的干涉条纹基底上出现飞秒量级的干涉条纹尖峰。当类噪声脉冲波包含有啁啾,典型的自相关曲线计算如图 7(b)所示。可以看到当脉冲含有啁啾,自相关曲线的基底变窄并且基底的包络曲线升高。文献[13]和[19]中的类噪声脉冲波包宽度分别为 15 ps 和 40 ps, 而给出干涉自相关曲线的窗口大小仅为 1.2 ps 和 4 ps。通过减小扫描窗口到 4 ps, 即模拟自相关仪的延时装置无法将类噪声脉冲波包完全分开的情况,得到的自相关曲线如图 7(c)所示。因自相关曲线的基底覆盖了整个扫描窗口,当以此基底为自相关曲线的背景时,峰值与背景的比值小于 8:1。因此实验中测量得到的峰值背景比小于 8:1 干涉自相关曲线,是类噪声脉冲波包宽度、类噪声脉冲啁啾、自相关仪扫描范围共同影响的结果。

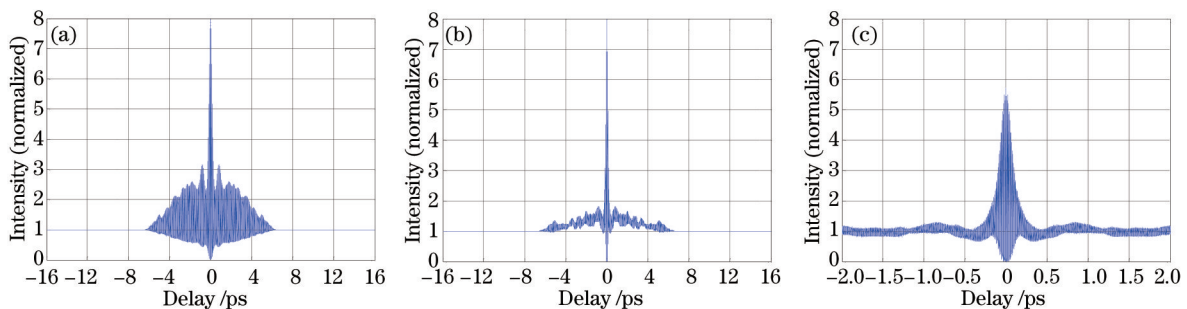


图 7 干涉自相关曲线。(a) 无啁啾, 32 ps 扫描窗口; (b) 有啁啾, 32 ps 扫描窗口; (c) 有啁啾, 4 ps 扫描窗口

Fig.7 Interferometric autocorrelation trace.(a) No chirp, 32 ps scan range; (b) chirp, 32 ps scan range; (c) chirp, 4 ps scan range

4 对模型中获得的类噪声脉冲的干涉自相关曲线模拟

第 3 节中根据类噪声脉冲的特征,通过各参量的设置直接得到了不同的类噪声脉冲并对其自相关曲线进行数值研究,明确了类噪声脉冲自相关曲线与各参量之间的关系。为了进一步验证类噪声脉冲干涉自相关曲线峰值背景比偏离 8:1 的特性,数值计算中还采用了另外一种方法获得类噪声脉冲。

通过扩展了的耦合金兹伯格-朗道方程可以描述光脉冲在光纤激光器中的传播。通过以此方程为基础的数值模型,适当选择光纤激光器中各参量的值,可以使模型运转在类噪声脉冲输出状态^[5,8]。模拟文献[5]中的光纤激光器,并在特定的参数条件下获得类噪声脉冲。模型中的类噪声脉冲是由孤子塌陷效应所引起的。若增加抽运功率,由于孤子塌陷效应,类噪声脉冲中单个孤子的脉冲能量不会明显增加,但是会分裂出更多的小脉冲。图 8(a)和 (b)所示是模型中令增益系数 g_0 分别等于 10000 和 20000 时所对应的类噪声脉冲。增益系数为 20000 时的类脉冲波包宽度、波包中脉冲个数都比增益系数为 10000 时的大。

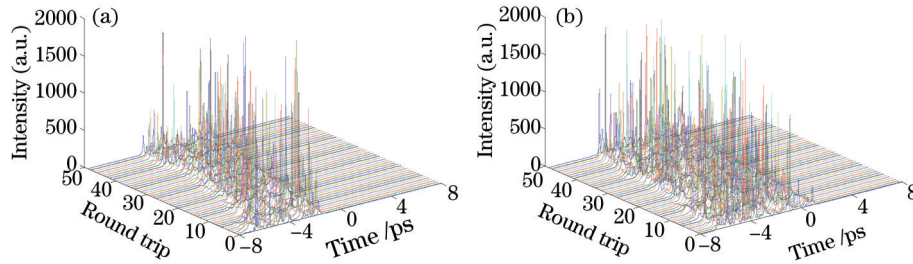


图8 数值模型中的类噪声脉冲演化。(a) $g_0 = 10000$; (b) $g_0 = 20000$

Fig.8 Typical bunched noise-like pulse emission in numerical calculation. (a) $g_0 = 10000$; (b) $g_0 = 20000$

图9(a)、(b)所示为扫描窗口为2 ps时计算得到的干涉自相关曲线,自相关曲线峰值与背景的比值分别为6.2:1和5.3:1。数值计算的结果再次验证类噪声脉冲干涉自相关曲线峰值背景比偏离8:1的特性。

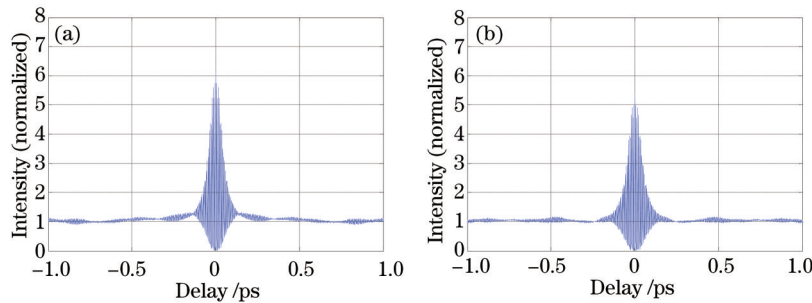


图9 干涉自相关.(a) $g_0 = 10000$; (b) $g_0 = 20000$

Fig.9 Interferometric autocorrelation trace. (a) $g_0 = 10000$; (b) $g_0 = 20000$

5 结 论

对类噪声脉冲的自相关特性进行了数值研究,明确了其无背景强度自相关曲线随类噪声脉冲波包宽度,类噪声脉冲平均脉宽,类噪声脉冲个数影响的变化规律。无背景强度自相关基底的宽度和形状反映了类噪声脉冲波包的宽度和形状,尖峰宽度则是内部飞秒结构的平均脉宽。类噪声脉冲波包中随着内部脉冲个数的增加,强度自相关曲线的尖峰与基底的峰值比变小。对其干涉自相关曲线的数值模拟显示,在类噪声脉冲不含有啁啾时,干涉自相关曲线表现为在皮秒量级的干涉条纹基底上出现飞秒量级的干涉条纹尖峰,曲线峰值与背景的比例为8:1。当类噪声脉冲带有啁啾时,通过选择不同大小的扫描窗口模拟其干涉自相关曲线,数值计算结果表明干涉自相关曲线峰值背景比例小于8:1,与实验测量结果符合。

参 考 文 献

- 1 Wang Dashuai, Wu Ge, Gao Bo, *et al.*. Study on output characteristics of a passively mode-locked Yb-doped fiber laser under limitation of finite gain bandwidth[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0902007.
王大帅, 吴戈, 高博, 等. 有限增益带宽下的被动锁模掺镱光纤激光器输出特性的研究[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0902007.
- 2 Ge Yanqi, Luo Jiaolin, Zhang Shumin, *et al.*. Transient process of dissipative soliton generation in normal dispersion fiber lasers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1005006.
葛颜绮, 罗娇林, 张书敏, 等. 正色散光纤激光器中耗散孤子形成的瞬态过程[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1005006.
- 3 Horowitz M, Barad Y, Silberberg Y. Noiselike pulses with a broadband spectrum generated from an erbium-doped fiber laser[J]. Optics Letters, 1997, 22(11): 799-801.
- 4 Takushima Y, Yasunaka K, Ozeki Y, *et al.*. 87 nm bandwidth noise-like pulse generation from erbium-doped fibre laser [J]. Electronics Letters, 2005, 41(7): 399-400.
- 5 Tang D, Zhao L, Zhao B. Soliton collapse and bunched noise-like pulse generation in a passively mode-locked fiber ring laser[J]. Optics Express, 2005, 13(7): 2289-2294.
- 6 Kobtsev S, Kukarin S, Smirnov S, *et al.*. Generation of double-scale femto/pico-second optical lumps in mode-locked fiber lasers[J]. Optics Express, 2009, 17(23): 20707-20713.

- 7 Li J, Zhang Z, Sun Z, *et al.*. All-fiber passively mode-locked Tm-doped NOLM-based oscillator operating at 2- μm in both soliton and noisy-pulse regimes[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7875-7882.
- 8 Zhao L M, Tang D Y, Wu J, *et al.*. Noise-like pulse in a gain-guided soliton fiber laser[J]. *Optics Express*, 2007, 15(5): 2145-2150.
- 9 Chen Y, Wu M, Tang P, *et al.*. The formation of various multi-soliton patterns and noise-like pulse in a fiber laser passively mode-locked by a topological insulator based saturable absorber[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(5): 055101.
- 10 Özgören K, Öktem B, Yilmaz S, *et al.*. 83 W, 3.1 MHz, square-shaped, 1 ns-pulsed all-fiber-integrated laser for micromachining[J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17647-17652.
- 11 Lin S S, Hwang S K, Liu J M. Supercontinuum generation in highly nonlinear fibers using amplified noise-like optical pulses[J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 4152-4160.
- 12 Huang D, Swanson E A, Lin C P, *et al.*. Optical coherence tomography[J]. *Science*, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- 13 Lecaplain C, Grellu Ph. Rogue waves among noise-like-pulse laser emission: An experimental investigation[J]. *Physical Review A*, 2014, 90(1): 013805.
- 14 Sala K, Kenney-Wallace G, Hall G. CW autocorrelation measurements of picosecond laser pulses[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(9): 990-996.
- 15 Diels J C M, Fontaine J J, McMichael I C, *et al.*. Control and measurement of ultrashort pulse shapes (in amplitude and phase) with femtosecond accuracy[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(9): 1270-1282.
- 16 Zhang Weili, Chai Lu, Dai Jianming, *et al.*. A real-time interferometric (8:1) autocorrelator[J]. *Chinese J Lasers*, 1997, 24(10): 915-919.
张伟力, 柴路, 戴建明, 等. 实时显示干涉(8:1)自相关器[J]. *中国激光*, 1997, 23(10): 915-919.
- 17 Ouyang Xiaoping, Zhang Fuling, Zhang Panzheng, *et al.*. Second order autocorrelation applied to femtosecond laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(3): 742-745.
欧阳小平, 张福领, 张攀政, 等. 短脉冲激光的二阶自相关[J]. *中国激光*, 2009, 36(3): 742-745.
- 18 Wang Q, Chen T, Zhang B, *et al.*. All-fiber passively mode-locked thulium-doped fiber ring oscillator operated at solitary and noise-like modes[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(19): 3750-3752.
- 19 Zhang Zhigang. *Femtosecond Laser Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2011: 207-208.
张志刚. *飞秒激光技术*[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 207-208.

栏目编辑: 史敏