

脉冲激光小尺度自聚焦过程中不同空间位置的时间演变研究

侯彦超 傅喜泉 刘 辉

(湖南大学信息科学与工程学院微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要 基于宽带啁啾脉冲的小尺度自聚焦形成过程, 利用包含时空项的非线性薛定谔方程进行数值计算, 比较分析了不同空间位置(特别是空间调制峰位置及调制谷位置)的时间演变过程, 发现不同空间位置的时间演化过程完全不一样。在小尺度自聚焦过程中, 调制峰处的脉宽随传输距离的增加而减小, 当调制峰值处的强度达到最大时, 其脉宽达到最小值; 而在调制谷位置处的脉宽则一直处于展宽状态。分析了脉冲啁啾对不同空间位置时间演变的影响规律, 负啁啾加速了调制峰位置处的脉冲压缩, 却抑制了调制谷位置的脉冲展宽; 而正啁啾则起相反的作用。

关键词 非线性光学; 时间演变; 小尺度自聚焦; 啁啾脉冲激光

中图分类号 O437.5 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0302015

Temporal Evolution of Laser Pulses with Small-Scale Self-Focusing in Different Spatial Positions

Hou Yanchao Fu Xiquan Liu Hui

(Key Laboratory for Micro/Nano Optoelectronic Devices of Ministry of Education, College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract Based on the process of broadband chirped pulse with small-scale self-focusing, spatial-temporal nonlinear Schrödinger equation is used for calculation. The temporal evolutions in different spatial positions have been investigated, especially the modulation peak and the modulation bottom in space. The results show that temporal evolutions in different spatial positions are completely different. The pulse width at modulation peak in space is decreasing with the increasing of transmission distance, and it will reach minimum when the intensity of modulation peak reaches maximum. However, the pulse width at modulation bottom is always broadend. In the end, chirps on the impact of temporal revolution in different locations have been studied. Negative chirp accelerates the pulse compression of modulation peak, but it inhibites the pulse broadening of modulation bottom. However, the positive chirp is counterproductive.

Key words nonlinear optics; temporal evolution; small-scale self-focusing; chirped pulse laser

OCIS codes 190.2640; 260.5950; 190.3270

1 引 言

自聚焦是非线性光学中一个最基本的物理现象^[1]。在高功率激光系统中, 介质的非线性折射率引起的自聚焦效应将会影响光束相位和强度分布,

增加光学元件遭受破坏的风险。对于光斑尺寸较大的光束来说, 当强激光通过非线性介质时, 更容易发生小尺度自聚焦, 小尺度自聚焦是导致光束质量下降和激光介质破坏的主要因素之一^[2~7], 这也是在

收稿日期: 2010-08-18; 收到修改稿日期: 2010-12-23

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金(10776008)、高等学校博士学科点专项科研基金(20070532075)、湖南省科学技术厅科技计划(2009FJ3112)和教育部留学回国人员科研启动基金资助课题。

作者简介: 侯彦超(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光光学和非线性光学等方面的研究。

E-mail: hou_yanchao@sina.com

导师简介: 傅喜泉(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光技术、非线性光学、超短脉冲传输与技术等方面的研究。

E-mail: fuxiquan@gmail.com(通信联系人, 中国光学学会会员号: S040M614)

高功率激光系统设计中需要尽量避免的问题。

自 20 世纪 60 年代以来,人们对长脉冲(纳秒量级)的全光束以及小尺度自聚焦进行了广泛而深入的研究。1966 年 Bespalov 等^[8]提出的 B-T 理论就对小尺度自聚焦成丝现象作出了比较简单合理的解释。但 B-T 理论并没有考虑时间上的扰动,1992 年 Liou 等^[9]详细研究了连续光的时空调制不稳定性,这种不稳定性调制可以在自聚焦和自散焦正色散和负色散介质中发生。在实验和理论方面,人们也做了大量的研究。Skupin 以及 Nurhuda 等^[10,11]分别研究了飞秒激光脉冲在空气和克尔介质中的小尺度自聚焦过程,并建立了相应的二维简化模型。文献^[3]和^[12]则通过实验研究了超短脉冲激光的空间小尺度自聚焦动态变化过程和受到衍射调制的啁啾脉冲激光小尺度自聚焦成丝过程。文双春等^[2,5,13]对光束小尺度自聚焦成丝的非线性理论和飞秒脉冲的调制不稳定性做了深入的研究。文献^[14]讨论了光束在增益介质中传输时小尺度自聚焦的特性,得出了截止频率、最快增长频率等特性随各参量的变化规律,并推出了小尺度自聚焦产生的最小传输距离。

虽然目前关于小尺度自聚焦的研究已很广泛,但大多文献都只是在一定的介质条件下对小尺度自聚焦的演变过程进行讨论,以及通过改变入射光强、入射脉冲宽度、啁啾等来探讨其对小尺度自聚焦的影响,并没有涉及到在具体位置(如空间调制峰值和调制谷)时间的演变过程。在激光脉冲传输过程中,小尺度自聚焦不同空间位置的时间会出现差异,从而影响激光脉冲的宽度,因此有必要对不同位置的时间演变进行研究。本文基于非线性薛定谔方程,通过数值模拟考察了脉冲激光在非线性介质中的动态传输过程,并着重分析了空间调制峰及调制谷位置

的时间演变过程,并探讨了不同的时间啁啾对空间调制峰及调制谷位置时间的影响。

2 小尺度自聚焦过程中的时间演变过程

为了研究宽带啁啾脉冲在非线性克尔介质中小尺度自聚焦的时空演变过程,本文采用包含时空的非线性薛定谔方程进行数值计算,计算中忽略损耗和高阶色散。包含时空的非线性薛定谔方程可写为

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \left[\frac{i}{2\beta_0} \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{i\omega_0 n_2}{c} |A|^2 \right] A, \quad (1)$$

式中 A 为输入脉冲的振幅, β_0 为传输常数, β_2 表示群速度色散(GVD), ω_0 是中心频率, n_2 是非线性折射率系数, c 是真空中光速。

利用分步傅里叶算法,采用(1)式中简化的(2+1)维非线性薛定谔方程进行计算。考虑到计算啁啾脉冲传输时采样所需的计算精度,在模拟分析时空取二维,输入场采用加入调制的啁啾高斯脉冲为

$$A = A_0 \left[1 + a_x \cos(f_x x) \right] \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{w_0} \right)^2 \right] \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{T_0} \right)^2 \right] \exp \left[-\frac{iC}{2} \left(\frac{t}{T_0} \right)^2 \right], \quad (2)$$

式中 a_x 为调制强度, f_x 为空间调制频率, w_0 为入射脉冲光斑半径, T_0 为初始脉冲宽度, C 为脉冲啁啾参量。计算所用参数为入射光强 $6 \times 10^{13} \text{ W/m}^2$, 群速度色散常数 $\beta_2 = 2.2 \times 10^{-29} \text{ s}^2/\text{m}$, n_0 和 n_2 分别为空气中的线性和非线性折射率系数, $n_0 = 1$, $n_2 = 5.6 \times 10^{-23} \text{ m}^2/\text{W}$ 。输入波长 775 nm, 入射脉冲腰斑半径为 3.5 cm, 初始脉冲宽度为 660 fs, 空间调制频率为 $f_x = 46.5 \text{ cm}^{-1}$, 调制强度 $a_x = 0.2$ 。

首先研究了无啁啾激光脉冲的空间对比度(峰值功率/平均功率)随传输距离的变化以及小尺度自聚焦在空间调制下的调制增长过程,如图 1 所示。

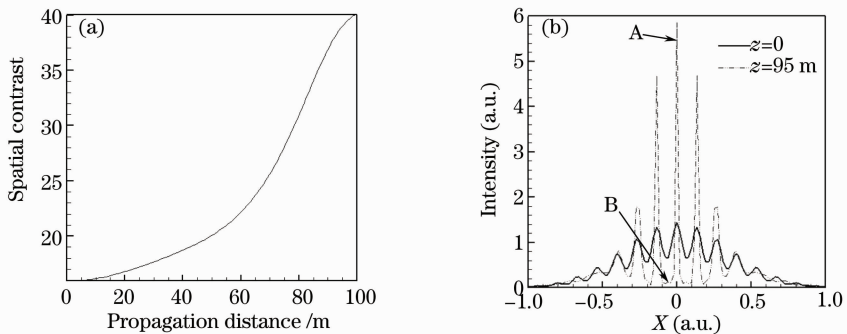


图 1 (a)空间对比度随传输距离的变化,(b)小尺度自聚焦调制增长过程

Fig. 1 (a) Variation of spatial contrast with propagation distance, (b) process of spatial modulation of small-scale self-focusing

由图 1(a)可以看出,随着传输距离的增大,激光脉冲的空间对比度快速增长,由此可知,激光脉冲在空间调制下其最大空间调制峰是一直增长的。在一定的空间调制下,随着传输距离的逐渐增加,激光脉冲开始在特定的位置上出现小尺度自聚焦增长,这些增长的幅度并不相同,在脉冲中心对称位置出现了两个最大的调制峰。这些增长点也不是无限增长的,先是增长逐渐变缓,达到一个增长最大值后又开始慢慢塌陷,形成周期的成丝及复原过程^[2,12]。激光脉冲在空间调制下的小尺度自聚焦增长动态变化过程如图 1(b)所示。从图中可以看到,在 $z=0$ 时,激光脉冲在特定位置处出现不同的增长。随着传输距离的增加,空间特定位置的强度持续增长,出现一个空间最大调制峰[图 1(b)中 A 位置处]以及两个相对应的调制谷[图 1(b)中 B 位置处],当 $z=95$ m 时空间调制峰达到最大。在整个小尺度自聚焦调制增长过程中,调制峰与调制谷的空间位置不会改变。

本文着重研究了宽带啁啾脉冲在小尺度自聚焦过程中的空间调制峰[图 1(b)中 A 位置处]及调制谷[图 1(b)中 B 位置处]的时间演变过程。对于超短激光脉冲来说,这种脉冲的脉宽由均方根宽度^[15]计算则更为精确,所以在数值模拟中采用均方根脉宽来计算脉冲宽度。均方根脉宽 σ 定义为

$$\sigma = [\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2]^{1/2}, \quad (3)$$

式中

$$\langle T^n \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} T^n |A(z, T)|^2 dT}{\int_{-\infty}^{\infty} |A(z, T)|^2 dT}. \quad (4)$$

在激光脉冲的小尺度自聚焦过程中,由于调制峰和调制谷位置处的强度不同,因强度不同引起的自相位调制也会变化,当自相位调制效应与色散效应的相对关系改变时,就会对调制峰及调制谷位置的时间演变产生影响。图 2 为当调制强度为 0.2 时,无啁啾激光脉冲在小尺度自聚焦过程中调制峰及调制谷位置的时间演变过程。从图中可以看出,空间调制峰处的脉宽随传输距离的增加逐渐减小(图 2 中 a 曲线所示),当调制峰的强度达到最大时[与图 1(b)中 $z=95$ m 时相对应],其脉宽达到最小值。而空间调制谷处的脉宽则一直处于展宽状态(图 2 中 b 曲线所示),这种展宽并不会无限的,最终会随着传输距离的增加达到一个稳定值。造成调制峰处脉宽压缩、调制谷处脉宽展宽的原因主要是由于在初始阶段,空间调制峰位置的脉冲强度相对较

低,随着传输距离的增加,此处的脉冲光强快速增长,远远超过了其他位置,因而调制峰处的非线性效应很强,由非线性效应引起的自相位调制效应远远大于群速度色散效应,从而导致在调制峰处的脉宽处于压缩状态。空间调制谷位置的脉冲强度从开始就处于衰减状态,相对应的脉宽就一直处于展宽状态。由于此处的脉冲强度并不是无限衰减,而是达到一定程度就不会再减弱,最终调制谷处的脉宽也会随着传输距离的增加达到一个稳定态。

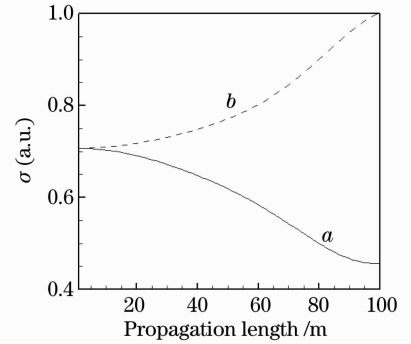


图 2 不同空间位置的时间演变

Fig. 2 Temporal evolution in different spatial positions

在最大调制峰处,该调制峰与空间其他调制峰在小尺度自聚焦调制增长过程中相对独立^[5],并且在时域上表现出与飞秒脉冲在非线性介质中整体传输时相类似的现象^[16,17],结果如图 3 所示。当在 $z=0$ 处时,初始的脉冲为高斯型(图 3 中实线)。随着传输距离的增加,该调制峰处的脉冲不断被压缩,当 $z=95$ m 时压缩到最大,这与图 2 中 a 曲线是一致的。随后脉冲在时域上开始出现分裂,从图 3 中可以清楚地看到当在 $z=100$ m 处时已经有很明显的分裂趋势,这是自相位调制效应和群速度色散效应共同作用的结果。在脉冲传输的初始阶段,空间调制峰处的自相位调制占主导地位,脉冲被压缩。当脉冲被压缩到最短时,群速度色散效应起主导作

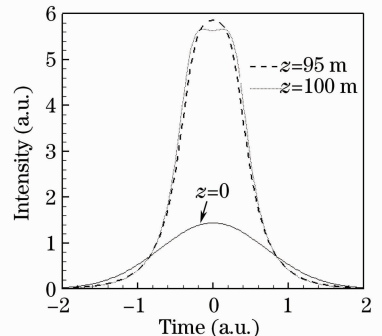


图 3 空间增长调制峰处的时间演变

Fig. 3 Temporal evolution of growth peak in space

用,激光脉冲又被展宽,随着传输距离的增大,在脉冲中心附近经受最强的自相位调制,引起脉冲啁啾,最终分裂为两个脉冲。

3 脉冲啁啾对时间演变的影响

2 节所得出的结果都是激光脉冲在无啁啾条件下进行的,也就是脉冲的初始啁啾为零。事实上,当今的超短脉冲激光器都采用了锁模技术,而放大则采用了啁啾脉冲放大技术,所有这些都与啁啾有关,因此就有必要考察脉冲啁啾对小尺度自聚焦过程中的调制峰与调制谷的影响。在模拟过程中,保持激光脉冲的入射峰值功率不变,只改变初始的脉冲啁啾。在不同的啁啾下,激光脉冲的小尺度自聚焦过程与图 1(b)类似,都是在特定的空间位置出现调制峰,不同的啁啾只是加速或抑制了小尺度自聚焦的形成过程,并不会改变调制峰及调制谷的位置。

在不同的脉冲啁啾条件下,小尺度自聚焦空间调制峰及调制谷位置的时间宽度变化如图 4 所示。

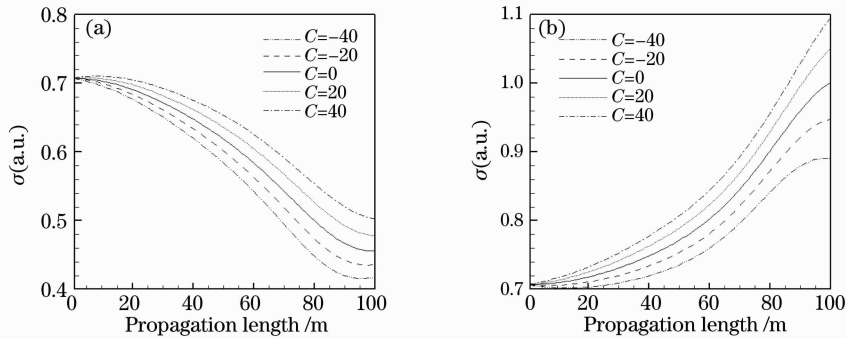


图 4 不同啁啾对空间不同位置处脉宽的影响。(a) 空间增长调制峰处,(b)空间增长调制谷处

Fig. 4 Different chirps on the impact of pulse width at different spatial positions. (a) growth peak, (b) growth bottom

4 结 论

采用分步傅里叶算法数值求解非线性薛定谔方程,研究了宽带啁啾脉冲在小尺度自聚焦过程中不同空间位置(特别是调制峰及调制谷位置)的时间演变过程,以及不同的空间脉冲啁啾对调制峰及调制谷处时间演变的影响。研究表明,小尺度自聚焦调制峰处的脉宽随传输距离的增加而减小,当调制峰处的强度达到最大时,其脉宽达到最小值,随后开始展宽;而调制谷位置处的脉宽则一直处于展宽状态,但是随着传输距离的增加也会达到一个最大值。不同的脉冲啁啾对于不同位置的时间演变过程作用是不同的。负啁啾加速了调制峰位置处的脉冲压缩,却抑制了调制谷位置的脉冲展宽;正啁啾则抑制了调制峰位置的脉冲压缩,却加速了调制谷位置的展宽。

从图 4(a)中可以看到,当 $C = -40$ 时,调制峰处的脉冲宽度快速压缩,并且压缩到最小值时的距离小于啁啾为 0 时的情况。当初始脉冲啁啾递增时,调制峰处的脉冲压缩逐渐减弱,并且压缩到极值的距离增加。相比之下,调制谷处的脉宽整体处于展宽状态,如图 4(b)所示。当脉冲啁啾为正时,脉冲展宽相对较快;当啁啾为负值时,脉冲展宽速度相对较慢,并且很快达到一个极大值。上面的模拟结果可以理解为脉冲啁啾通过加速或抑制小尺度自聚焦的形成,来影响空间调制峰及调制谷位置的时间变化。当脉冲啁啾为负时,啁啾加速了小尺度自聚焦的形成过程,并且加强了调制增长的幅度,相应地,在调制峰位置处的自相位调制加强,最终加速了调制峰值处的脉冲压缩。当脉冲啁啾为正时,啁啾在一定程度上抑制了小尺度自聚焦的形成,使调制峰处的脉宽压缩速度变得缓慢,却加速了调制谷位置处的展宽。

参 考 文 献

- 1 Y. R. Shen. The Principles of Nonlinear Optics[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1984
- 2 Wen Shuangchun, Fan Dianyuan. Nonlinear theory of filamentation of intense laser beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12): 1458~1462
文双春, 范滇元. 光束成丝的非线性理论[J]. *光学学报*, 2001, **21**(12): 1458~1462
- 3 Zhang Lifu, Fu Xiquan, Feng Zehu *et al.*. Experimental research of pulsed chirp effect on the small-scale self-focusing[J]. *Science in China G*, 2008, **38**(10): 1372~1379
章礼富, 傅喜泉, 冯则胡 等. 脉冲啁啾对空间小尺度自聚焦影响的实验研究[J]. *中国科学 G 辑*, 2008, **38**(10): 1372~1379
- 4 Y. R. Shen, Michael M. T. Loy. Theoretical interpretation of small-scale filaments of light originating from moving focal spots [J]. *Phys. Rev. A*, 1971, **3**(6): 2099~2105
- 5 Wen Shuangchun, Qian Liejia, Fan Dianyuan. A study on multiple filamentation of locally modulated laser beams[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(7): 1640~1643

- 文双春, 钱列加, 范滇元. 强光束局部小尺度调制致多路成丝现象研究[J]. 物理学报, 2003, **52**(7): 1640~1643
- 6 A. J. Campillo, S. L. Shapiro, B. R. Suydam. Periodic breakup of optical beams due to self-focusing[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**(11): 628~630
- 7 Zhang Yanli, Li Xiaoyan, Zhu Jianqiang. Small-scale self-focusing of divergent beams in gain medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 786~793
- 张艳丽, 李小燕, 朱健强. 增益介质中发散光束的小尺度自聚焦[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 786~793
- 8 V. I. Bespalov, V. I. Talanov. Filamentary structure of light beams in nonlinear liquids[J]. *Sov. Phys. JEPT Lett.*, 1966, **3**: 307~310
- 9 L. W. Liou, X. D. Cao, C. J. McKinstrie *et al.*. Spatiotemporal instabilities in dispersive nonlinear media [J]. *Phys. Rev. A*, 1992, **46**(7): 4202~4208
- 10 S. Skupin, L. Bergé, U. Peschel *et al.*. Filamentation of femtosecond light pulses in the air: turbulent cells versus long-range clusters[J]. *Phys. Rev. E*, 2004, **70**(4): 046602
- 11 M. Nurhuda, A. Suda, M. Hatayama *et al.*. Propagation dynamics of femtosecond laser pulse in argon[J]. *Phys. Rev. A*, 2002, **66**(2): 023811
- 12 Feng Zehu, Fu Xiquan, Zhang Lifu *et al.*. Experimental research of small-scale self-focusing of ultrashort pulse with spatial modulation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(4): 2253~2258
- 冯则胡, 傅喜泉, 章礼富等. 超短脉冲激光空间调制下小尺度自聚焦的实验研究[J]. 物理学报, 2008, **57**(4): 2253~2258
- 13 Wen Shuangchun, Fan Dianyuan. Spatiotemporal instability in nonlinear dispersive media in the presence of space-time focusing effect[J]. *Science in China A*, 2002, **45**(9): 1192~1201
- 文双春, 范滇元. 有时空聚焦效应情形下非线性色散介质中的时空不稳定性[J]. 中国科学 A 辑, 2002, **45**(9): 1192~1201
- 14 Lin Xiaodong, Wang Xiao, Li Dayi *et al.*. Analysis of small-scale self-focusing effects in nonlinear media with gain[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(5): 418~420
- 林晓东, 王道, 李大义等. 非线性增益介质中的小尺度自聚焦特性分析[J]. 中国激光, 2002, **A29**(5): 418~420
- 15 G. P. Agrawal. Principle and Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. 42~49
- G. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003. 42~49
- 16 A. A. Zozulya, S. A. Diddams, T. S. Clement. Investigations of nonlinear femtosecond pulse propagation with the inclusion of Raman, shock, and third-order phase effects[J]. *Phys. Rev. A*, 1998, **58**(4): 3303~3310
- 17 Zhang Shuanggen, Huang Zhangchao, Xue Yuming *et al.*. Self-focusing effect of ultra-short laser pulse propagation during quasi-phase matched crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2550~2553
- 张双根, 黄章超, 薛玉明等. 准相位匹配晶体中超短脉冲传输的自聚焦效应[J]. 中国激光, 2010, **37**(10): 2550~2553