

双曲正割脉冲在光纤中传输的非线性效应

陶世兴¹, 杨丽玲², 赵新才¹, 胡 腾¹, 李建中¹, 彭其先¹

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所 光电子学研究室, 四川 绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院科技信息中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 高斯型脉冲在光纤中的传输已有解析解, 而对于一些锁模激光器发射的双曲正割脉冲在光纤中的传输特性尚未有解析解。为了研究高功率双曲正割脉冲在单模光纤中的传输特性, 文中借助于分步傅里叶方法分析了峰值功率 5 000 W 的双曲正割脉冲在初始啾啾为 1.7 rad/s, 色散长度 0.64 m, 非线性长度 1.53 m 时 1 m 长的光纤中的脉冲演化过程。结果表明, 其色散感应脉冲展宽的定性特征与高斯脉冲近似一致, 但色散感应的频率啾啾沿脉冲不再是纯线性变化, 若输入脉冲峰值功率过大, 会引起频谱振荡。

关键词: 分布傅里叶法; 双曲正割脉冲; 频率啾啾; 频谱振荡

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2669-03

Nonlinear effects of hyperbolic secant pulse transmission in fiber

Tao Shixing¹, Yang Liling², Zhao Xincan¹, Hu Teng¹, Li Jianzhong¹, Peng Qixian¹

(1. Photoelectronics Laboratory, Institute of Fluid Physics, China Academic of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Science and Technology Information Center, China Academic of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The transmission characteristics of Gaussian pulses in optical fiber has been solved by analytical solutions, but that of hyperbolic secant pulses emitted by mode-locked laser only depend on numerical methods. In order to study the transmission characteristics of hyperbolic secant pulse with high-power in a single-mode optical fiber, the split-step Fourier method was used to analysis the transmission procedure of the hyperbolic secant pulse in single mode fiber with initial chirp 1.7 rad/s, dispersion length 0.64 m, nonlinear length 1.53 m and length 1 m. The results indicate that the dispersion inductive spread of the hyperbolic secant pulse is consistent with the Gauss pulse, but its dispersion inductive frequency chirp is not vary linearly. It will also arouse the spectral oscillation if the input power is too high.

Key words: split-step Fourier method; hyperbolic secant pulse; frequency chirp; spectral oscillation

收稿日期: 2013-02-09; 修订日期: 2013-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(069830); 中国工程物理研究院 909 专项基金(009920)

作者简介: 陶世兴(1983-), 男, 博士, 主要从事光电子器件与系统研发方面的研究。Email: optics109@163.com

0 引言

光纤的非线性效应由光纤纤芯中较大的功率密度引起,主要包括克尔效应和受激散射效应。前者包括自相位调制(SPM)、互相位调制(XPM)和四波混频(FWM)等;后者包括受激布里渊散射(SBS)和受激拉曼散射(SRS)等^[1-2]。对于做谱分割脉冲,尤其需要考虑自相位调制效应^[3-7]。高斯型脉冲在光纤中的传输通过求解非线性薛定谔方程已经有解析解,而对于一些锁模激光器发射的双曲正割脉冲,只能通过数值方法求解^[8-11]。文中通过分布傅里叶法仿真分析了双曲正割脉冲在光纤中的传输,仿真结果发现,对于有初始啁啾脉冲,其演化受色散和初始啁啾和脉冲功率影响,且会引起频谱的振荡结构。

1 理论分析及仿真

光脉冲在单模光纤内传输的非线性薛定谔(NLS)方程为^[1]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i\gamma \left(|A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} |A|^2 A - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right) \quad (1)$$

式中: A 为脉冲振幅; α 为衰减系数; β_2 为群速度色散; β_3 为三阶色散; $\gamma(\omega_0) = \frac{n_2(\omega_0)\omega_0}{cA_{eff}}$ 为非线性参量, n_2 为非线性折射率系数, A_{eff} 为有效模场面积, c 为光速; T_R 为非线性响应函数的一阶矩。

对于啁啾高斯脉冲:

$$U(0, T) = \exp \left[-\frac{(1+iC) T^2}{2 T_0^2} \right] \quad (2)$$

式中: C 为啁啾参量。对上式进行傅里叶变换,可以得到频谱表达式:

$$\tilde{U}(0, \omega) = \left(\frac{2\pi T_0^2}{1+iC} \right)^{1/2} \exp \left[-\frac{\omega^2 T_0^2}{2(1+iC)} \right] \quad (3)$$

而对于一些锁模激光器发出的双曲正割脉冲:

$$U(0, T) = \operatorname{sech} \left(\frac{T}{T_0} \right) \exp \left(-\frac{iCT^2}{2T_0^2} \right) \quad (4)$$

一般情况下其傅里叶变换没有解析解,考虑双曲正割脉冲在光纤中传输时,尤其是需要考虑非线性效应时,一般都采用分步傅里叶法。分布傅里叶法假定在传输过程中,光场每通过一小段距离 h ,色散

和非线性效应可以分别作用,即从 z 到 $z+h$ 的作用可以分两步进行:第一步,仅有非线性作用;第二步,仅有色散作用。

利用分布傅里叶法计算了 3 dB 线宽 200 fs, 3 dB 谱宽 40 nm, 啁啾因子为:

$$\Delta\omega = (1+C^2)^{1/2}/T_0 = 1.7 \quad (5)$$

峰值功率分别为 5 000 W, 6 000 W 的双曲正割脉冲在普通单模光纤中传输 0~1 m 的时域、频域变化,分别如图 1~4 所示。

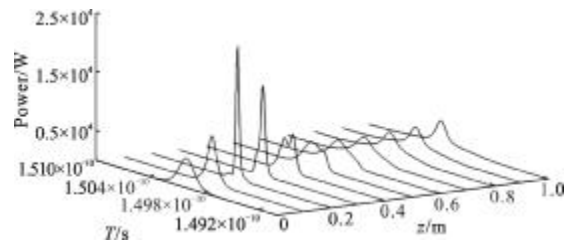


图 1 峰值功率 5 000 W 的脉冲波形演化

Fig.1 Shape evolution of pulse with peak power of 5 000 W

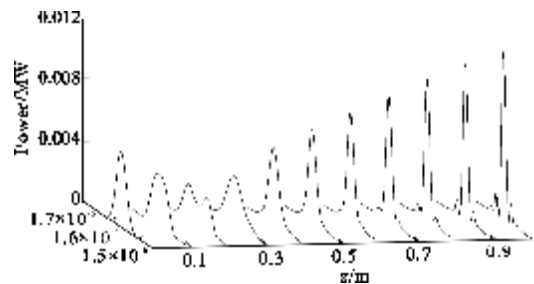


图 2 峰值功率 5 000 W 的脉冲频谱演化

Fig.2 Spectral evolution of pulse with peak power of 5 000 W

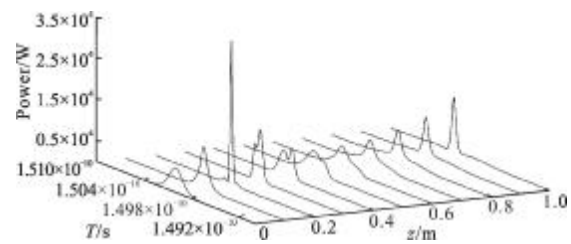


图 3 峰值功率 6 000 W 的脉冲波形演化

Fig.3 Shape evolution of pulse with peak power of 6 000 W

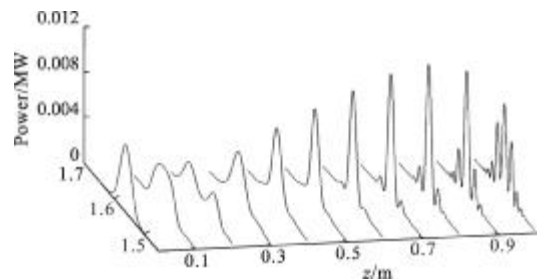


图 4 峰值功率 6 000 W 的脉冲频谱演化

Fig.4 Spectral evolution of pulse with peak power of 6 000 W

2 讨论

对于高功率脉冲在光纤中的传输, 需要考虑群速度色散 GVD 和自相位调制 SPM 的综合作用。色散长度为:

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (6)$$

对于普通单模光纤, 有 $\beta_2 = -20 \text{ ps}^2/\text{km}$, 对于双曲正割脉冲, 有

$$T_{\text{FWHM}} = 2\ln(1 + \sqrt{2})T_0 \approx 1.763T_0 \quad (7)$$

将 $T_0 = 113.4 \text{ fs}$ 代入公式(6), 得到 $L_D = 0.64 \text{ m}$ 。

非线性长度为:

$$L_{\text{NL}} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (8)$$

对于普通单模光纤, $n_2 = 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, $A_{\text{eff}} = 80 \mu\text{m}^2$, 当峰值功率 P_0 为 5000 W , 6000 W 时, 非线性长度分别为 1.53 m , 1.273 m 。若光纤长度 $L \ll L_D$ 且 $L \ll L_{\text{NL}}$, 色散和非线性效应都不起重要作用, 当光纤长度 $L \ll L_{\text{NL}}$ 且 $L \approx L_D$ 时, 在脉冲演化中 GVD 起主要作用, 非线性效应相对较弱。当光纤长度 $L \ll L_D$ 且 $L \approx L_{\text{NL}}$ 时, SPM 对光脉冲的演化起主要作用, 它将导致脉冲频谱的变化。因此, 对于图中光纤传输长度 1 m , 色散和非线性效应共同对脉冲在光纤中的传输起作用。

啁啾双曲正割脉冲在光纤中传输, 其形状取决于色散感应的频率啁啾和输入啁啾, 若 β_2 与输入啁啾同号, 即 $\beta_2 C > 0$, 色散感应的频率啁啾和输入啁啾同号, 总的啁啾量变大, 啁啾脉冲被单调展宽, 并且展宽速度比无啁啾脉冲快。若 $\beta_2 C < 0$, 色散感应的频率啁啾与输入啁啾符号相反, 脉冲在传输一定距离后变为无啁啾, 即脉宽在开始时减小并达到最小值, 之后色散感应啁啾占优势从而脉冲逐渐展宽, 如图2所示。

比较图 1, 图 2 可知, 谱宽与线宽成反比例变化, 脉冲在光纤中传输 0.5 m 之后, 线宽增加, 进而引起光谱压缩 ($40 \text{ nm} \rightarrow 31 \text{ nm}$); 经过 1 m 长光纤之后, 主峰谱宽进一步被压缩 ($31 \text{ nm} \rightarrow 17 \text{ nm}$), 但整个光谱变宽, 而且由于 SPM 效应使频谱出现振荡结构, 两振荡峰位于主峰两侧。输入双曲正割峰值功率为 6000 W 时, 相对于峰值功率 5000 W , 在光纤中传输 1 m 后, 光纤非线性效应明显增强, SPM 感应的频谱展宽在整个频率范围内伴随着振荡结构。

3 结论

高功率双曲正割脉冲激光在普通单模光纤中传输时, 会引起明显的非线性效应, 色散感应脉冲展宽的定性特征与高斯脉冲近似一致, 但色散感应的频率啁啾沿脉冲不再是纯线性变化。且其与峰值功率强度及光纤传输长度密切相关。当使用高功率脉冲激光时, 可以考虑尽量减小无源器件尾纤长度从而尽量减小非线性影响。

参考文献:

- [1] Agrawa I G P. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electrical Industry, 2002. (in Chinese)
- [2] Zhao Xinhai, Gao Yang, Xu Meijian, et al. Power delivery characteristics of fibers for high-peak power pulse laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37 (3): 444-448. (in Chinese)
- [3] Zhu Lijuan. SPM-induced spectral broadening [J]. Study on Optical Communications, 2009 (5): 30-32. (in Chinese)
- [4] Zhu Weiming, Yao Duanzheng, Chen Su. Self-phase modulation dependent transmission characteristics of super-Gaussian pulses in photonic crystal fibers[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(12): 2252-2255. (in Chinese)
- [5] Cao Yile, Yu Li, Yang Bojun. Effects of dispersion and self-phase modulation on pulses in solid-state laser [J]. Laser Technology, 2005, 29(3): 248-250. (in Chinese)
- [6] Ma Zairu, Zhu Qihua, Feng Guoying, et al. Effects of self-phase modulation of chirped pulses on compressed pulses[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17 (3): 391-394. (in Chinese)
- [7] Li Junhong, Wang Zhongqing. Numerical research of initial chirp effect on solitons propagation properties [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(3): 193-195. (in Chinese)
- [8] Muslu G M, Erbay H A. Higher-order split-step Fourier schemes for the generalized nonlinear Schrodinger equation [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2005, 67: 581-595
- [9] Stoffa P L, Fokkemet J T, de Luna Freires R M, et al. Step-step Fourier migration [J]. Geophysics, 1990, 55 (4): 410-421.
- [10] Oleg V Sinkin. Optimization of the split-step fourier method in modeling optical-fiber communications systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(1): 61-68.
- [11] Xu Haibin, Gan Liangqin, Gu Juguang. The free propagation characters of Hermite-Gaussian beams passing through hard edge aperture[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(10): 779-781.