

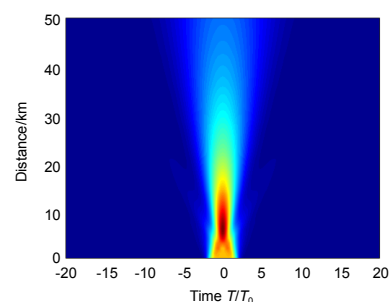


DOI: 10.12086/oe.2018.180096

## 余弦-超高斯脉冲的演化特性研究

邹德峰, 李晓辉\*, 柴通

陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710119



**摘要:** 本文研究了余弦-超高斯(CSG)脉冲在光纤中的演化特性并对 CSG 脉冲在光纤中的传输过程进行了数值研究。得到了脉冲的初始相位  $\varphi_0$  和脉冲阶数  $m$  对脉冲传输过程及其演化规律的影响。结果表明, 增大  $\varphi_0$  值到 80 rad 时的一阶余弦-超高斯脉冲可以在相对较长的光纤中实现脉冲压缩; 而高阶余弦-超高斯脉冲在经历较短的脉冲压缩后, 随即展宽。脉冲阶数越高, 其脉冲压缩所经历光纤长度越短。本文还将余弦-超高斯脉冲、简单高斯脉冲和双曲正割脉冲进行对比, 对比结果表明双曲正割脉冲展宽速度最快, 简单高斯脉冲次之, 而余弦-超高斯脉冲的展宽速度最慢。所提出的余弦-超高斯脉冲对光纤色散不敏感, 该研究对于实际中要得到大容量, 长距离通讯用的特殊脉冲的研究提供了一定的理论依据。

**关键词:** 光纤; 余弦-超高斯脉冲; 光纤色散; 演化; CSG

**中图分类号:** O437; TN253

**文献标志码:** A

**引用格式:** 邹德峰, 李晓辉, 柴通. 余弦-超高斯脉冲的演化特性研究[J]. 光电工程, 2018, 45(10): 180096

## Investigation of the cosine-super Gaussian pulses evolution

Zou Defeng, Li Xiaohui\*, Chai Tong

School of Physics &amp; Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119, China

**Abstract:** The evolution of cosine-super Gaussian (CSG) pulses propagating in a conventional single mode fiber (SMF) has been proposed. The propagation properties of CSG pulses are numerically studied by using split-step Fourier method, and the effects of initial phase  $\varphi_0$  and order of the pulse  $m$  are analyzed. Results show that when  $\varphi_0$  is increased to 80 rad, the first order CSG pulse will be compressed in a relatively long fiber, and then broaden monotonically; the higher order CSG pulses will experience a short compression first, and then broaden monotonically. In addition, the CSG pulses are compared with simple Gaussian pulses and Hyperbolic secant pulses. The results indicate that the Hyperbolic secant pulse broaden fastest; the simple Gaussian pulse broaden secondly; CSG pulses broaden slowest, which is most insensitive to the dispersion of fiber. The research work will pave a way to realize a special pulse in large-capacity, and long-range communications.

**Keywords:** fiber; cosine-super Gaussian pulse; fiber dispersion; evolution; CSG

**Citation:** Zou D F, Li X H, Chai T. Investigation of the cosine-super Gaussian pulses evolution[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(10): 180096

收稿日期: 2018-03-02; 收到修改稿日期: 2018-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(61605106); 中国科学院瞬态光学与光子学国家重点实验室开放性研究基金(SKLST201401); 陕西师范大学启动基金(1112010209, 1110010717)资助

作者简介: 邹德峰(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事空间光束的传输特性的研究。E-mail: zoudefeng@snnu.edu.cn

通信作者: 李晓辉(1983-), 男, 教授, 主要从事超短脉冲激光器的研究。E-mail: lixiaohui@snnu.edu.cn

# 1 引言

脉冲在光纤中传输时, 由于受到色散的作用, 脉冲会随着传输距离的增加而逐渐展宽。色散作用是入射光信号与光纤中电解质的相互作用, 通常表现为光纤折射率  $n$  与光脉冲频率  $\omega$  有关<sup>[1-3]</sup>。在光纤通信过程中, 脉冲展宽会导致脉冲相互叠加, 提高误码率, 进而减小通信容量, 这对于远距离传输的光纤通信是十分不利的, 所以对光脉冲在光纤中的传输特性进行研究, 具有广泛的现实意义。自上世纪 80 年代起, 研究人员对于常见的高斯脉冲, 啁啾高斯脉冲, 贝塞尔脉冲以及相对于高斯脉冲具有更加陡峭的前后沿的超高斯脉冲都进行了大量的研究<sup>[4-6]</sup>。另外。近年来余弦-高斯(cosine Gaussian, CG)脉冲的传输特性, 超短艾里脉冲在光纤中的传输效应<sup>[7-8]</sup>也被广泛研究。而对于余弦-超高斯脉冲的展宽特性还未见报道。

本文研究了余弦-超高斯脉冲在普通单模光纤传输过程中, 受到色散作用的展宽特性。采用分步傅里叶法<sup>[9-10]</sup>, 建立仿真模型, 分析脉冲的初始相位  $\varphi_0$ , 超高斯脉冲阶数  $m$  作用下余弦-超高斯脉冲入射场分布及其在光纤中传输演化特性, 并与普通高斯脉冲和双曲正割脉冲受色散效应的展宽情况进行对比。数值研究了选择合适的参数  $\varphi_0$  和  $m$  光脉冲在光纤的压缩。这对于实现抗脉冲畸变和展宽引起的信息丢失具有重要的应用价值和研究意义, 也为后续实验实现高性能通讯用脉冲, 提供重要的理论支持。

## 2 理论推导

### 2.1 非线性薛定谔方程

光脉冲在光纤中传输时, 满足非线性薛定谔方程 (nonlinear Schrodinger equation, NLSE<sup>[11]</sup>):

$$i \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{i\alpha}{2} U - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} + \gamma |U|^2 U = 0 \quad (1)$$

式中:  $U(z,t)$  代表光脉冲的归一化振幅,  $\beta_2$  是二阶群速度色散系数,  $\alpha$  和  $\gamma$  分别对应于光纤中的损耗和非线性效应,  $T$  是考虑群延时后的时间变量。在远离零色散点, 光纤非线性较弱时, 非线性项不起主要作用, 对应的方程通解为<sup>[12]</sup>

$$U(z,T) = \frac{1}{2\pi} \int \tilde{U}(0,\omega) \exp\left(i \frac{\beta_2 \omega^2 z}{2} - i\omega T\right) d\omega \quad (2)$$

$$\tilde{U}(0,\omega) = \int U(0,T) \cdot \exp(i\omega T) dT \quad (3)$$

其中:  $U(0,T)$  是入射脉冲光场分布,  $\tilde{U}(0,\omega)$  是  $U(0,T)$  的傅里叶变换, 对于入射余弦-超高斯脉冲的情况<sup>[13]</sup>:

$$U(0,T) = A \exp\left[-\frac{\cos^2 \varphi_0}{4} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{2m}\right] \cdot \cos\left[\frac{\sin 2\varphi_0}{8T_0^2} T^2 + \left(\varphi - \frac{\varphi_0}{2}\right)\right] \quad (4)$$

式中:  $A$  是入射光场振幅,  $m$  为余弦-超高斯脉冲的阶数,  $m$  越大, 入射光脉冲前后沿越陡峭, 脉冲中间波峰越平, 脉冲越接近矩形而非高斯型,  $\varphi_0$  是余弦-超高斯脉冲的相位。由欧拉公式可知, 余弦-超高斯脉冲可以由两个干涉的超高斯脉冲叠加得到,  $\varphi_0$  对应这两个超高斯脉冲的相位差。

### 2.2 分步傅里叶法

NLSE 是非线性偏微分方程, 在入射余弦-超高斯脉冲时情况比较复杂, 很难求出解析解。这里使用分步傅里叶法(split-step Fourier method, SSFM)进行光脉冲在光纤中传输的仿真模拟<sup>[14]</sup>, 可以把 NLSE 改写成:

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

其中:  $\hat{D}$  和  $\hat{N}$  分别是代表色散和非线性效应的算符。光脉冲在光纤中传输时, 色散和非线性是共同作用的。SSFM 假设在传播距离很小的  $z$  到  $z+h$  上, 色散和非线性单独作用。其数学表达式为

$$U(z+h,T) = A(z,T) \exp(h\hat{N}) \exp(h\hat{D}) \quad (6)$$

求解可得色散算符:

$$U(z,T) = \tilde{F} \left\{ \exp\left(\frac{i}{2} \beta_2 \omega^2\right) \cdot \tilde{U}(0,\tilde{\omega}) \right\} \quad (7)$$

然后求解非线性算子, 得到:

$$U(z,T) = \tilde{F} \{ \exp[i\gamma P_0 |U(0,T)|^2 z] \cdot \tilde{U}(0,\tilde{\omega}) \} \quad (8)$$

## 3 模拟结果与分析

### 3.1 余弦-超高斯脉冲入射场分布

根据式(4)可以得到余弦-超高斯脉冲的入射光场分布情况。由于光束阶数  $m$  和相位  $\varphi_0$  对于脉冲的入射光场分布起决定性作用, 因此图 1 和图 2 分别将光束阶数  $m$  和相位  $\varphi_0$  作为控制变量, 讨论其对于脉冲的入射场分布的影响。图 1(a)是一阶余弦-超高斯脉冲入射光场分布随  $\varphi_0$  的变化情况, 这里将脉冲阶数固定为  $m=1$ (图 1), 讨论源平面上入射光束的光场分布随相位  $\varphi_0$  的变化情况。  $\varphi_0=0$  rad 时对应超高斯脉冲, 即一阶余弦-超高斯脉冲的包络。随着  $\varphi_0$  的增大, 光脉冲受余弦函数调制加强, 脉冲左右两侧逐渐出现对称的受余弦函数调制的旁瓣。图 1(b)是三阶余弦-超高斯脉冲( $m=3$ )入射光场分布随  $\varphi_0$  的变化情况, 可以发现相

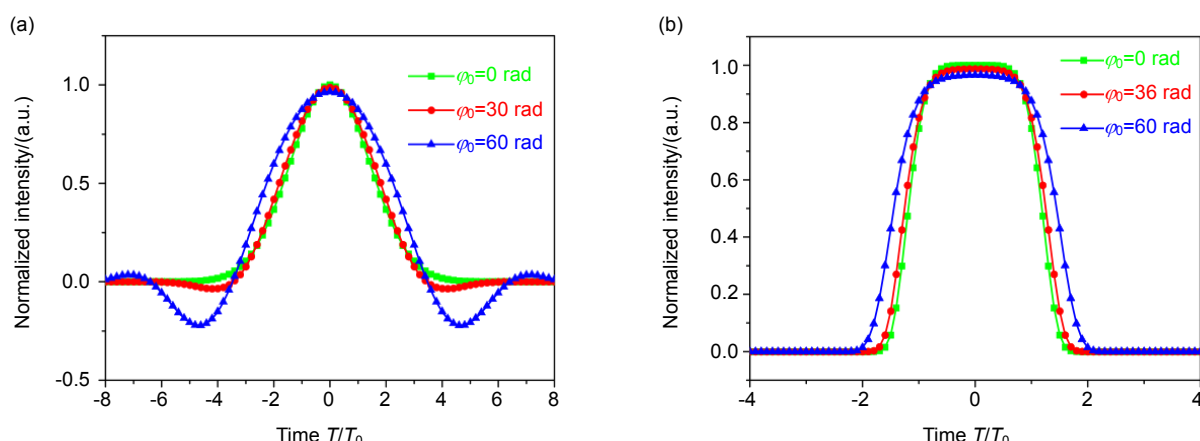


图 1 不同  $\varphi_0$  时入射脉冲的入射场分布。(a)  $m=1$ ; (b)  $m=3$   
 Fig. 1 Incident pulses field distribution of different  $\varphi_0$ . (a)  $m=1$ ; (b)  $m=3$

较于一阶余弦-超高斯脉冲，三阶余弦-超高斯脉冲的前后沿变得陡峭，并且抵制余弦函数调制的能力增强。随着  $\varphi_0$  的增大，脉冲宽度稍有增加，脉冲强度略有下降，但未出现余弦调制旁瓣。在实际传输过程中，高能脉冲因非线性影响或多或少会引起脉冲分裂。余弦调制旁瓣，可以更接近实际脉冲的特性，另外也可以探索这一特殊脉冲在光纤中的特性。

图 2 取  $\varphi_0=60$  rad，讨论超高斯脉冲阶数  $m$  对其入射光场分布的影响。分别取  $m$  等于 1, 2, 3 和 5 的情况，可以观察到随着  $m$  的增大，脉冲前后沿越来越陡峭，脉冲宽度变窄，并且脉冲抵御余弦调制能力增强，不再具有受余弦函数调制的对称旁瓣。另外，我们知道，入射光脉冲的场分布与初始啁啾无关<sup>[15]</sup>，因此在初始脉冲设置时未考虑啁啾特性。

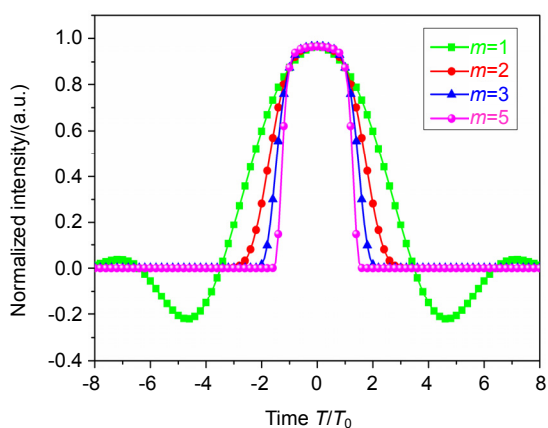


图 2 不同  $m$  入射脉冲的入射场分布  
 Fig. 2 Incident pulses field distribution of different  $m$

### 3.2 $\varphi_0$ 对余弦-超高斯脉冲演化的影响( $m=1$ )

光纤中光脉冲能量的损耗可以通过外部光纤放大器进行补偿，这里可以不考虑光纤的损耗，定义脉冲展宽率(pulse broaden ratio, PBR)等于输出脉冲的半高全宽  $T_{FWHM}(out)$ 与输入脉冲半高全宽  $T_{FWHM}(in)$ 的比值。图 3 是不同  $\varphi_0$  取值下的一阶余弦-超高斯(1st CSG)脉冲的 PBR 曲线图。可以看到  $\varphi_0=0$  rad 时对应简单高斯脉冲的情况，脉冲单调展宽。随着  $\varphi_0$  的增加，脉冲继续展宽但展宽速率下降。在  $\varphi_0=70$  rad 左右，脉冲传输过程中由于受到余弦调制而产生的压缩和受到色散效应产生的展宽达到平衡。进一步增加  $\varphi_0$  到  $\varphi_0=80$  rad 时，PBR 曲线不再上升而是下降，脉冲得到持续压缩。图 4 是  $\varphi_0=80$  rad 时光脉冲在光纤中传输的三维演化图，可以看到在固定长度光纤输出的脉冲，随着初始

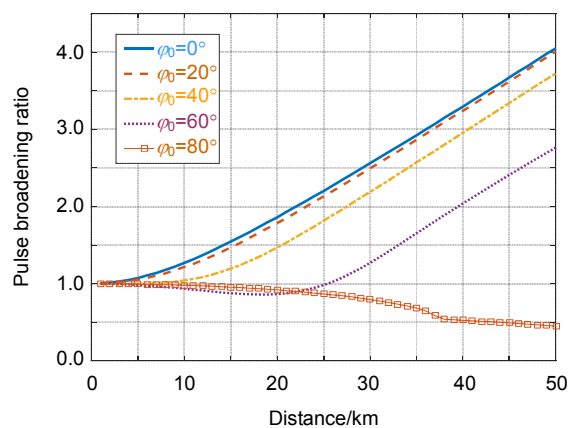


图 3 不同  $\varphi_0$  时的一阶 CSG 脉冲展宽率曲线  
 Fig. 3 1st order CSG pulses PBR graphs under different  $\varphi_0$

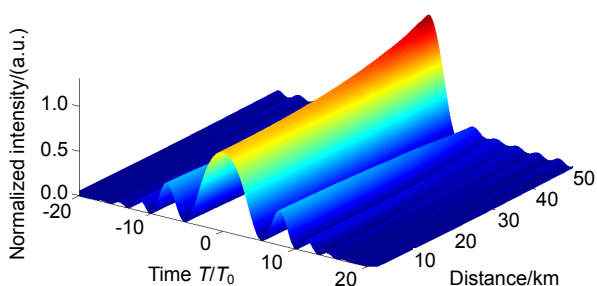


图 4  $\varphi_0=80$  rad 时的脉冲三维演化

Fig. 4 Three-dimensional evolution of pulses at  $\varphi_0=80$  rad

相位的增大, 脉冲的压缩距离变长。

### 3.3 $m$ 对余弦-超高斯脉冲演化的影响( $\varphi_0=80$ rad)

讨论超高斯阶数  $m$  对余弦-超高斯脉冲传输演化的影响。图 5(a)和 5(b)分别是  $\varphi_0=80$  rad,  $m=3$  的三阶余弦-超高斯(3rd CSG)脉冲在光纤中传输的三维和二维

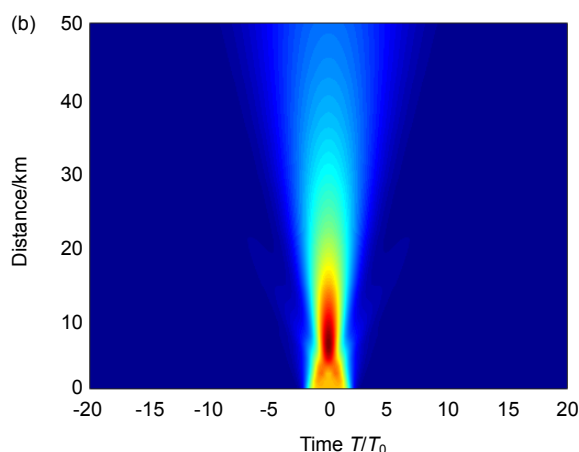
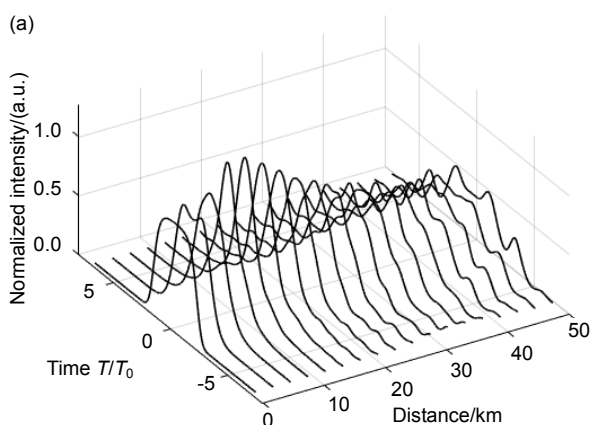


图 5 三阶余弦-超高斯脉冲演化

Fig. 5 The evolution of 3rd order CSG pulses

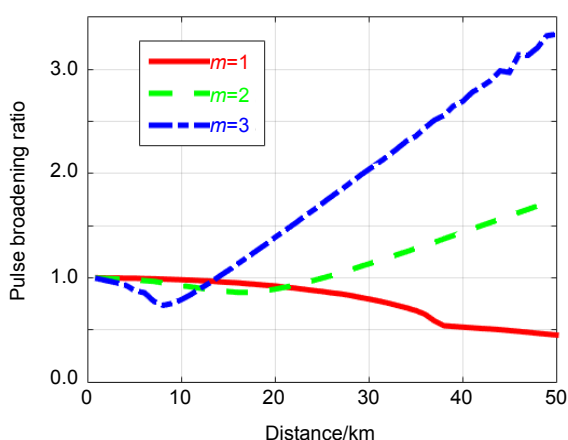


图 6 不同  $m$  下的 CSG 脉冲展宽率曲线

Fig. 6 CSG pulses PBR curves under different  $m$

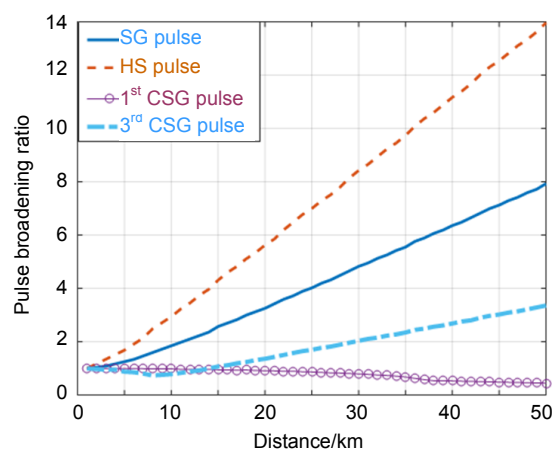


图 7 与简单高斯和双曲正割脉冲进行对比

Fig. 7 Comparison with the simple Gaussian and hyperbolic secant pulses

维演化情况。对比图 4 和图 5, 可以看到三阶余弦-超高斯脉冲和一阶余弦-超高斯脉冲的演化情况有很大区别。在超高斯阶数  $m$  和余弦调制系数  $\varphi_0$  的共同作用下, 初始入射脉冲不再具有图 4 所示的余弦调制旁瓣。随着传输距离的增加, 脉冲由单峰结构变成多峰结构, 同时脉冲被压缩。随着传输距离的继续增加, 脉冲逐渐展宽, 余弦调制越来越明显, 脉冲再次变成多峰结构, 并且波形发生巨大变化。

图 6 是不同  $m$  取值下的脉冲展宽情况,  $m=1$  对应图 4 的一阶余弦-超高斯脉冲的演化情况, 脉冲得到压缩。 $m=2$  和  $m=3$  时脉冲传输趋势大体相同,  $m=3$  时获得脉宽最小值时所对应的传输距离  $z$  更小。

### 3.4 与高斯脉冲以及双曲正割脉冲情况进行对比

最后, 将入射余弦-超高斯脉冲的情况与简单高斯 (simple Gaussian, SG) 脉冲和双曲正割 (hyperbolic se-

cant, HS)脉冲对比, 结果如图 7 所示。

在其他环境参数相同, 只考虑色散的情况下, 高斯脉冲和双曲正割脉冲都被线性展宽, 并且双曲正割脉冲展宽速度最快。三阶余弦-超高斯脉冲在经历短暂的压缩后仍然线性展宽, 但展宽速度相对高斯脉冲和双曲正割脉冲有所减慢, 在一定程度上补偿了色散效应带来的脉冲展宽。只有一阶余弦-超高斯( $\varphi_0=80$  rad)脉冲的展宽率曲线单调递减, 实现了讨论光纤范围内脉冲的压缩。

## 4 结 论

本文研究了 CSG 脉冲在光纤中的传输效应, 讨论了参数  $\varphi_0$  和  $m$  对初始入射脉冲场分布和脉冲传输过程的影响。结果表明初始啁啾  $C$  不影响入射脉冲的场分布。当  $m$  保持不变,  $\varphi_0$  逐渐增大时, 入射脉冲脉宽变宽, 脉冲两侧产生对称旁瓣, 可以有效地类比实际光脉冲传输过程中因非线性而产生的能量损耗, 当增大到  $\varphi_0=80$  rad 时, 讨论长度的光纤内脉冲不再展宽而是压缩。而保持  $\varphi_0$  不变, 增大超高斯阶数  $m$  时, 脉冲前后沿越来越陡峭, 脉宽变窄, 同时脉冲抵御余弦调制能力加强, 由于余弦调制而产生的旁瓣逐渐消失。相应的, 高阶 CSG 随着超高斯阶数  $m$  的增大, 脉冲压缩距离不断减小, 然后单调展宽。最后, 将入射余弦-超高斯脉冲和简单高斯脉冲以及双曲正割脉冲三种情况进行对比, 结果表明, 相对于简单高斯脉冲和双曲正割脉冲, 高阶 CSG 脉冲展宽速度最慢, 但只有  $\varphi_0=80$  rad 的一阶余弦-超高斯脉冲得到了长距离光纤内的脉冲压缩, 表现出对光纤中色散的不敏感性。该研究对于优化现有光纤通信系统, 进一步构建大容量、长传输距离、低误码率、强抗噪能力的光纤通信系统具有应用价值和研究意义。

## 参考文献

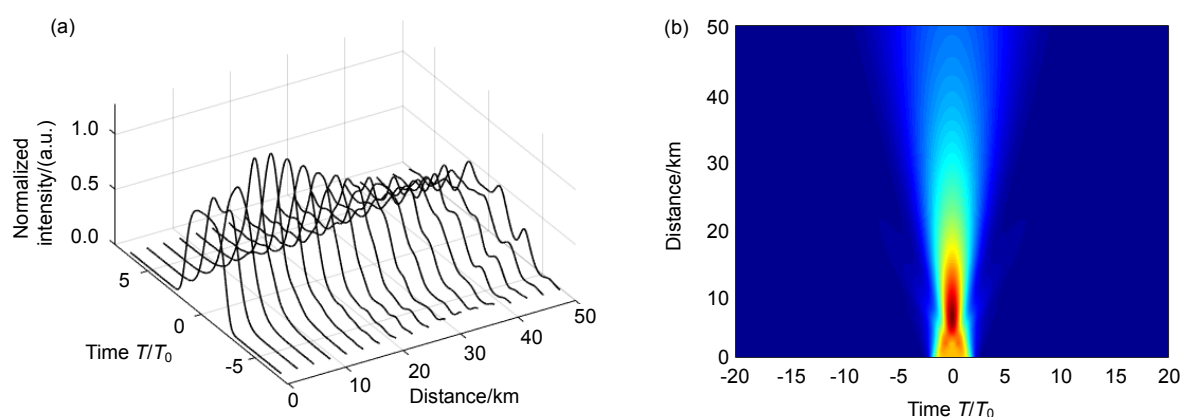
- [1] Chu Z Z, Liu J, Guo Z N, et al. 2  $\mu\text{m}$  passively Q-switched laser based on black phosphorus[J]. *Optical Materials Express*, 2016, **6**(7): 2374–2379.
  - [2] Lu S B, Ge Y G, Sun Z B, et al. Ultrafast nonlinear absorption and nonlinear refraction in few-layer oxidized black phosphorus[J]. *Photonics Research*, 2016, **4**(6): 286–292.
  - [3] Yao Y H, Xu C, Zheng Y, et al. Femtosecond laser-induced upconversion luminescence in Rare-Earth ions by nonresonant multiphoton absorption[J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2016, **120**(28): 5522–5526.
  - [4] Zhao Y H, Zheng Y, Zhang Y P, et al. The study of pulse broadening of Chirped Gaussian pulses in fiber[J]. *Optoelectronic Technology*, 2006, **26**(3): 177–180, 184.
- 赵玉辉, 郑义, 张玉萍, 等. 啁啾高斯脉冲在光纤中传输的脉冲

- 展宽研究[J]. *光电子技术*, 2006, **26**(3): 177–180, 184.
- [5] Wang Y, Li Y Q, Li X J, et al. Research on characteristics of super-Gaussian optical pulses without initial chirps in single-mode fibers[J]. *Study on Optical Communications*, 2015, **41**(1): 17–19.
  - [6] Zou Q H, Lü B D. Temporal and spectral properties of Bessel-Gauss pulsed beams in dispersive media[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(3): 368–371.
  - [7] Liu H, Wang L, Gao X R. Dispersion effect of Cos-Gaussian laser pulses in single mode fiber[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(12): 30–33.
  - [8] Zhao H, Song Z M, Lin Y X. Dispersion effect on Ultrashort Airy Pulse Propagation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(S1): s132001.
  - [9] Yin G L, Lou S Q. Study of interaction of GVD and SPM in fiber with symmetric split-step Fourier method[C]//*Proceedings of the Symposium on Advanced Optical Technology and Applications (Part 2)*, 2009.
  - [10] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. Jia D F, Yu Z H, trans. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
  - [11] Hamza M Y, Saeed S, Sarwar N, et al. Investigations for the evolution behavior of cos-gauss pulse in dispersion dominant regime of single mode optical fiber[J]. *Engineering Letters*, 2014, **22**(2): 83.
  - [12] Li J, Huang D X, Zhang X L. Numerical analysis of fiber propagation model[J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2003, **16**(2): 9–12.
  - [13] Zhao L, Sui Z, Zhu Q H, et al. Improvement and precision analysis of the split-step Fourier method in solving the general nonlinear Schrödinger equation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **58**(7): 4731–4737.
  - [14] Li Y, Cui Q F. The numerical simulation to nonlinear Schrodinger equation based on SSFT[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2011, **34**(1): 43–45, 60.
  - [15] Zheng H J, Liu S L, Li X, et al. Effect of initial frequency chirp on the linear propagation characteristics of the hyperbolic secant optical pulse[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(4): 2286–2292.
- 李均, 黄德修, 张新亮. 光纤传输模型的数值计算研究[J]. *光电子技术与信息*, 2003, **16**(2): 9–12.
- 赵磊, 隋展, 朱启华, 等. 分步傅里叶法求解广义非线性薛定谔方程的改进及精度分析[J]. *物理学报*, 2009, **58**(7): 4731–4737.
- 李莹, 崔庆丰. 基于分步傅里叶变换法对非线性薛定谔方程的数值仿真[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2011, **34**(1): 43–45, 60.
- 郑宏军, 刘山亮, 黎昕, 等. 初始啁啾对双曲正割光脉冲线性传输特性的影响[J]. *物理学报*, 2007, **56**(4): 2286–2292.

# Investigation of the cosine-super Gaussian pulses evolution

Zou Defeng, Li Xiaohui\*, Chai Tong

School of Physics & Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119, China



The evolution of 3rd-order CSG pulses

**Overview:** The evolution of cosine-super Gaussian pulses propagating in a conventional single mode fiber (SMF) has been proposed. The propagation properties of cosine-super Gaussian pulses are numerically studied by using split-step Fourier method, and the effects of initial phase  $\varphi_0$  and order of the pulse  $m$  are analyzed because of their decisive roles in the process of pulse propagation. First, we discuss the effects of two parameters  $\varphi_0$  and  $m$  on the distributions of the cosine-super Gaussian pulse on the source plane. When the pulse order  $m$  is fixed, the optical pulse will be strengthened by the cosine function modulation with the increase of  $\varphi_0$ . The sidelobes of the cosine function modulation are gradually appeared on the both sides of the pulse. When initial phase  $\varphi_0$  is fixed, the ability of the cosine-super Gaussian pulse to resist cosine modulation is strengthened, and the cosine modulated sidelobes will not appear. In the actual transmitting process, the pulse with high energy will experience the splitting of the pulse owing to the nonlinear effects in the fiber. The cosine modulated sidelobes of the cosine-super Gaussian pulse will be closer to the actual propagation characteristics of the pulse. After that, the effects of two parameters initial phase  $\varphi_0$  and order of the pulse  $m$  propagation process of the cosine-super Gaussian pulse are discussed, respectively. Here the pulse width broaden ratio is defined as that the ratio between the full width at half maximum of output pulse and the input pulse. By observing the pulse width broaden ratio curves, we can see that when  $\varphi_0$  is increased to 80 rad, the first order cosine-super Gaussian pulse will be compressed in a relatively long fiber, and then broaden monotonically; the higher order cosine-super Gaussian pulses will experience a short compression first, and then broaden monotonically. Especially, the third-order cosine-super Gaussian pulse is selected and we find that under the combined effects of the  $\varphi_0$  and  $m$ , the initial incident pulse no longer has the sidelobes. The third-order cosine-super Gaussian pulse turns to the multi-model structure from the single peak structure, and experiences the compression at the same time. In addition, the cosine-super Gaussian pulses are compared with simple Gaussian pulses and Hyperbolic secant pulses. The results indicate that the Hyperbolic secant pulses broaden fastest; the simple Gaussian pulses broaden secondly; cosine-super Gaussian pulses broaden slowest, which are most insensitive to the dispersion of fiber. The research work will pave a way to realize a special pulse in large-capacity, and long-range communications.

**Citation:** Zou D F, Li X H, Chai T. Investigation of the cosine-super Gaussian pulses evolution[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(10): 180096

Supported by National Natural Science Foundation of China (61605106), the Open Research Fund of State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Chinese Academy of Sciences (SKLST201401), and Starting Grants of Shaanxi Normal University (1112010209, 1110010717)

\* E-mail: lixiaohui@snnu.edu.cn