

文章编号: 1001-3806(2020)03-0388-05

## 超高斯型色散渐减光纤中脉冲的传输特性分析

史圣达, 张巧芬\*, 吴黎明

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

**摘要:** 为了研究超高斯脉冲在具有不同陡峭程度的超高斯型色散渐减光纤中的传输特性, 采用了非线性薛定谔方程和分步傅里叶变换的方法, 数值模拟了超高斯脉冲在超高斯型色散渐减光纤中的演化规律。在反常色散区考虑色散和非线性效应的情况下, 对超高斯脉冲的阐述特性进行了时域和频域上的理论分析与实验验证。结果表明, 陡峭程度  $m=4$  时, 超高斯型色散渐减光纤的传输特性最好。此研究对超高斯型色散渐减光纤中脉冲的传输特性分析是有帮助的。

**关键词:** 光纤光学; 超高斯型色散渐减光纤; 超高斯脉冲; 非线性薛定谔方程; 陡峭程度; 反常色散区

**中图分类号:** O437 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2020.03.021

### Analysis of transmission characteristics of pulses in super-Gaussian dispersion-decreasing fibers

SHI Shengda, ZHANG Qiaofen, WU Liming

(Key Laboratory of Precision Microelectronic Manufacturing Technology, School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** In order to study the propagation characteristics of super-Gaussian pulse in super-Gaussian dispersion decreasing fiber with different steepness, the nonlinear evolution of Gaussian pulse in the super-Gaussian dispersion-decreasing fiber was numerically simulated by using the nonlinear Schrödinger equation and the stepwise Fourier transform method. The theoretical analysis and experimental verification of the super-Gaussian pulse in the time domain and frequency domain were carried out with consideration of dispersion and nonlinear effect in the abnormal dispersion zone. The results show that, when the steepness  $m=4$ , the super-Gaussian dispersion-decreasing fiber has the best transmission characteristics, so it is concluded that the higher the steepness  $m$  is, the better the transmission characteristics of pulse will be.

**Key words:** fiber optics; super-Gaussian dispersion-decreasing fiber; super-Gaussian pulse; nonlinear Schrödinger equation; steepness; anomalous dispersion region

## 引言

在过去的几年中, 超高斯脉冲引起了广泛的关注。超高斯脉冲<sup>[1-4]</sup>是由直接调制的半导体激光器发射的, 具有较陡峭的前后沿的高斯脉冲。AGRAWAL 等人对超高斯脉冲在单模光纤中传输进行了一些研究。在单模光纤中传输光信号时, 会产生较大的色散、衰减和非线性, 这些因素限制了光信号传输的距离和准确性。为提高超高斯脉冲的传输特性, 作者将超高斯脉冲在色散渐减光纤<sup>[1,5]</sup> (dispersion-decreasing fiber, DDF) 中

传输。DDF 是光学纤维的一种, 它的色散系数沿着传播方向逐渐减小, 这种特性会维持色散效应和非线性效应之间的平衡, 减小脉冲在传输时的展开和畸变<sup>[6-10]</sup>。作者研究了超高斯脉冲在超高斯型 DDF 的陡峭程度  $m$  为 2, 3, 4 时的传输特性, 并分析出最适合超高斯脉冲传输的超高斯型 DDF。

## 1 脉冲传输的理论分析

光脉冲在光纤中传输时满足非线性薛定谔方程<sup>[2]</sup>, 使用分步傅里叶变换的方法推导下列方程:

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

式中,  $A$  为脉冲包络的慢变振幅;  $T$  为随脉冲以群速度移动的时间;  $Z$  为传输距离;  $\beta_2$  为光纤 2 阶色散系数;  $\alpha$  为损耗系数;  $\gamma$  为非线性系数。通过(1)式对光纤传

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61705045)

作者简介: 史圣达(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为导波光学与光通信技术。

\* 通讯联系人。E-mail: zhqf@gdut.edu.cn

收稿日期: 2019-06-20; 收到修改稿日期: 2019-08-19

输进行了分析研究。利用分步傅里叶变换的方法研究了超高斯脉冲在色散渐减光纤中传输特性。

$$\frac{\partial A}{\partial Z} = (D + N)A \quad (2)$$

式中,  $D$  为差分算子, 表示线性介质的色散和吸收;  $N$  是非线性算子, 决定脉冲在传输过程中光纤非线性效应的影响。(2)式是对(1)式进行了改写, 是为了进一步进行傅里叶变换。

$$D = \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} \quad (3)$$

$$N = i\gamma |A|^2 \quad (4)$$

在 DDF 中,  $\beta_2$  是沿着传输方向减小的量。

$$\beta_2 = \beta_2(0)P(Z) \quad (5)$$

式中,  $P(Z)$  为色散函数, 决定色散系数的变化。本文中所采用的是超高斯型色散函数, 为了研究超高斯脉冲的传输特性, 对超高斯脉冲进行了分析, 超高斯脉冲的推广为下面的形式<sup>[11]</sup>:

$$A(0, T) = \exp\left[\frac{1+iC}{2}\left(\frac{T}{T_0}\right)^{2m}\right] \quad (6)$$

式中,  $C$  为啁啾参量,  $T_0$  为输入脉冲,  $m$  为脉冲的陡峭程度。超高斯脉冲是具有陡峭前后沿的高斯脉冲, 而陡峭程度是由  $m$  决定的。将(6)式进行傅里叶变化:

$$A(0, \omega) = \left(\frac{2\pi T_0^{2m}}{1+iC}\right)^{\frac{1}{2m}} \exp\left[-\frac{\omega^2 T_0^{2m}}{2(1+iC)}\right] \quad (7)$$

式中,  $\omega$  为角速度。在 DDF 中, 当色散随超高斯形式变化时, 色散函数<sup>[12-13]</sup>为:

$$P(Z) = \exp\left[-\left(\frac{Z^{2m}}{L^{2m}}\right)\ln k\right] \quad (8)$$

式中,  $L$  为光纤长度,  $k$  为光纤起始端与末端的 2 阶色散系数的比值。色散函数可以决定色散渐减光纤的色散变化趋势, 为了探究超高斯型 DDF 的色散特性, 对  $m$  为 2, 3, 4 时的色散函数进行仿真, 图 1 展示的是超高斯型 DDF 在  $m$  为 2, 3, 4 时色散函数的传输特性。

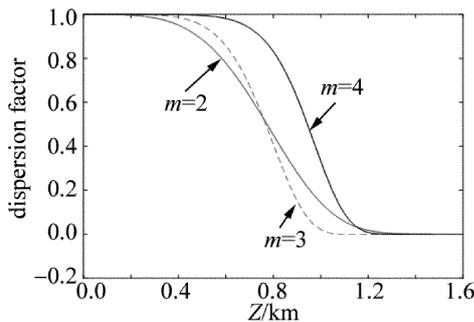


Fig. 1 Transmission curve of dispersion function with  $m = 2, 3, 4$

如图 1 所示, 具有不同陡峭程度的色散函数具有不同的传输特性。  $m$  的值决定传输曲线的变化趋势。

$m$  的值越大, 曲线开始变化的越缓慢。随着传输距离的增加, 函数的色散因子会趋于 0。

超高斯脉冲的陡峭程度  $m$  越大, 脉冲的波形展宽就越大, 信号畸变就越大。所以本文中将使用  $m = 2$  时的超高斯脉冲作为理想输入脉冲。

## 2 仿真模拟结果

本文中主要研究不同初始啁啾的超高斯脉冲在超高斯型 DDF 中的传输特性。将  $m = 2$  时的超高斯脉冲作为输入脉冲, 色散系数  $\beta_2 = -20\text{ps}^2/\text{km}$ 、非线性系数  $\gamma = 3.33\text{W}^{-1}/\text{km}^{-1}$ 、 $\lambda = 1550\mu\text{m}$ 、初始脉宽  $T_0 = 1\text{ps}$ 、峰值功率  $P_0 = 1\text{W}$  作为本实验的脉冲参量和光纤参量。接下来分析初始啁啾变化以及超高斯型 DDF 中陡峭程度  $m$  的变化对脉冲传输的影响。

### 2.1 初始啁啾 $C = 0$ 时脉冲传输特性分析

脉冲展宽的程度取决于初始啁啾和超高斯脉冲的陡峭程度, 超高斯脉冲的传输特性是由群速度色散和自相位调制效应共同决定的。在时域中传输特性主要取决于初始啁啾和群速度色散效应, 图 2 是  $C = 0$  时,

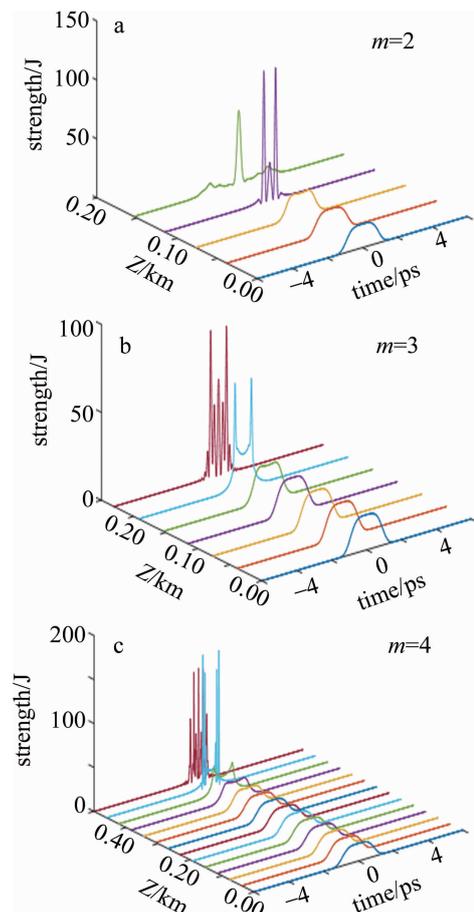


Fig. 2 Time domain characteristics when  $C = 0$ , steepness  $m = 2, 3, 4$

超高斯脉冲在超高斯型 DDF 陡峭程度  $m$  为 2,3,4 时的时域特性。

由图 2a 可知,当脉冲传输约 0.11km 时出现了多峰结构,能量主要集中在中央峰中。产生多峰结构的原因主要是因为反常色散区会因为色散和非线性效应之间的相互作用导致的调制不稳定性。随着传输距离的增加,脉冲展宽变大,脉冲畸变,最终脉冲信号被噪声所取代。脉冲展宽的速度主要取决于群速度色散效应对传输特性的影响。图 2b 中所示,当脉冲传输约 0.185km 时出现了多峰结构,随着传输距离的增大,脉冲逐渐展宽最终被噪声替代,相对于图 2a,图 2b 中的传输距离变大,脉冲展宽速度减弱。图 2c 中所示,当脉冲传输约 0.41km 时出现了多峰结构,随着传输距离的增大,脉冲逐渐展宽最终被噪声替代,相对于图 2a 和图 2b,图 2c 中的传输距离变大,脉冲展宽速度减弱。由此从时域角度分析,超高斯型 DDF 中陡峭程度  $m$  的值越大,对色散束缚的能力就越强,群速度色散和自相位调制之间的平衡时的时间就越久,脉冲展宽的速度就越慢,传输距离就越远,信号畸变就越小。得出

结论:在时域分析中,无初始啁啾时, $m$  的值越大,超高斯型 DDF 的传输特性越好。

频谱的特性主要取决于初始啁啾与自相位调制的相互作用,图 3 是无初始啁啾时,超高斯脉冲在超高斯型 DDF 陡峭程度  $m$  为 2,3,4 时的频谱特性。

由图 3a 可知,当脉冲传输约 0.07km 时频谱出现了明显的多峰结构,能量主要集中在中央峰中。产生多峰结构的原因主要是因为频谱特性受自相位调制所影响,同样大小的啁啾出现在两个不同的点上,这两个点具有相同的瞬时频率。这两个点代表频率相同但是相位不同的两个波,根据它们的相对相位差会发生相加或相消干涉,形成脉冲频谱的多峰结构。当脉冲传输约 0.11km 时,频谱出现明显的展宽,而频谱展宽会导致脉冲的展宽。这是因为自相位调制感应的频率啁啾随传输距离的增加而增大,当脉冲沿光纤传输时,新的频率分量不断产生,从而展宽了频谱,导致脉冲展宽。在传输过程中,脉冲的形状发生了畸变,这是因为群速度色散引起的脉冲整形。图 3b 中所示,当脉冲传

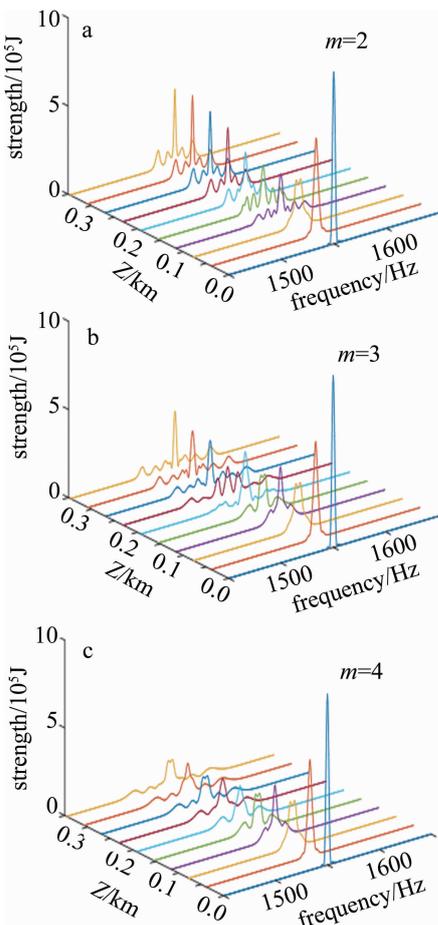


Fig. 3 Spectral characteristics of the super-Gaussian pulse with no initial chirp at the dispersion function  $m = 2, 3, 4$

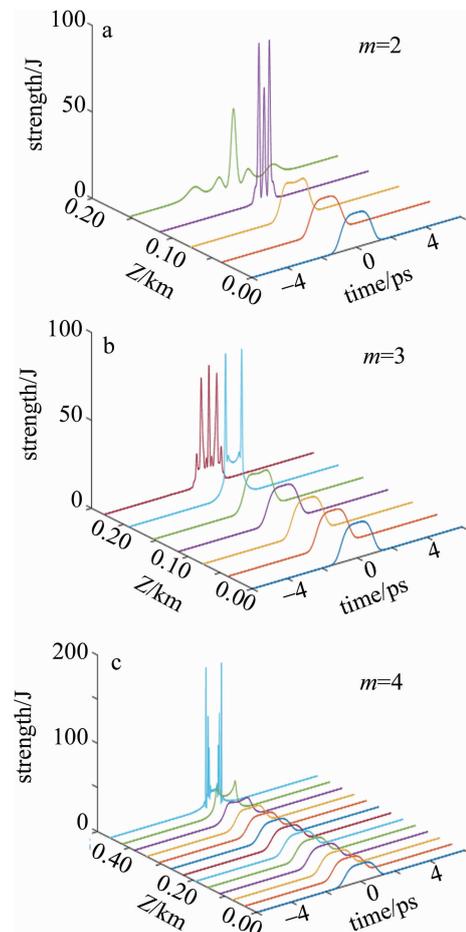


Fig. 4 Time domain characteristics of super-Gaussian pulse with initial chirp of 2 when dispersion function  $m = 2, 3, 4$

输约0.07km 时出现明显的多峰结构,当脉冲传输约0.225km 时频谱出现明显展宽。图3c 中所示,当脉冲传输约0.07km 时出现明显的多峰结构,当脉冲传输约0.26km 时频谱出现明显展宽。由此从频谱角度分析,色散会引起频域中脉冲的整形,超高斯型 DDF 中陡峭程度  $m$  的值越大,脉冲的畸变就越小,频谱展宽就越小,频谱特性就越好。

2.2 初始啁啾  $C=2$  时脉冲传输特性分析

图4 是初始啁啾  $C=2$ 、超高斯脉冲在超高斯型 DDF 陡峭程度  $m=2,3,4$  时的时域特性。图4 与图2 的传输特性基本相同,只是脉冲的形状和展宽程度有所不同。因为初始啁啾与群速度色散产生的正啁啾叠加,净啁啾增大。

图5 是初始啁啾  $C=2$ 、超高斯脉冲在超高斯型 DDF 陡峭程度  $m$  为 2,3,4 时的频谱特性。由图5a 可知,脉冲传输约0.11km 时频谱出现明显的多峰结构,与图3 相比频谱展宽程度更加剧烈,频谱畸变变小。图5b 中所示,脉冲传输约0.225km 时出现明显展宽

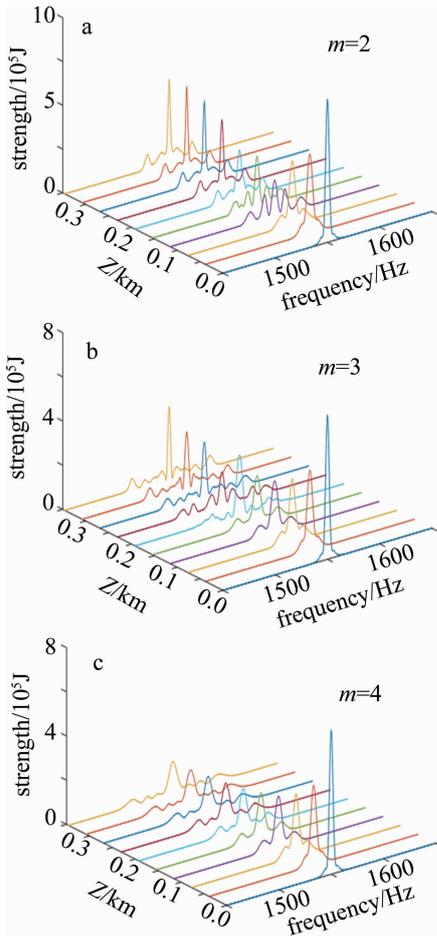


Fig. 5 Spectral characteristics of super-Gaussian pulse with initial chirp of 2 when dispersion function  $m=2,3,4$

现象,频谱展宽程度变大,频谱畸变变小。图5c 中所示,脉冲传输约0.225km 时频谱出现展宽,展宽程度较小,频谱畸变较小。由此从频谱角度分析,超高斯型 DDF 中陡峭程度  $m$  的值越大,脉冲展宽程度就越小,波形的畸变越小。初始啁啾可以改变脉冲的展宽程度,由图5 和图3 的对比可知,图5 中的脉冲展宽程度变大,频谱畸变变小。

2.3 初始啁啾  $C=-2$  时脉冲传输特性分析

图6 是初始啁啾  $C=-2$ 、超高斯脉冲在超高斯型 DDF 陡峭程度  $m$  为 2,3,4 时的时域特性。由于图6 与图2 传输特性相同,只是脉冲的形状和展宽程度有所不同。因为初始啁啾与群速度色散产生的负啁啾相抵消,净啁啾减小。

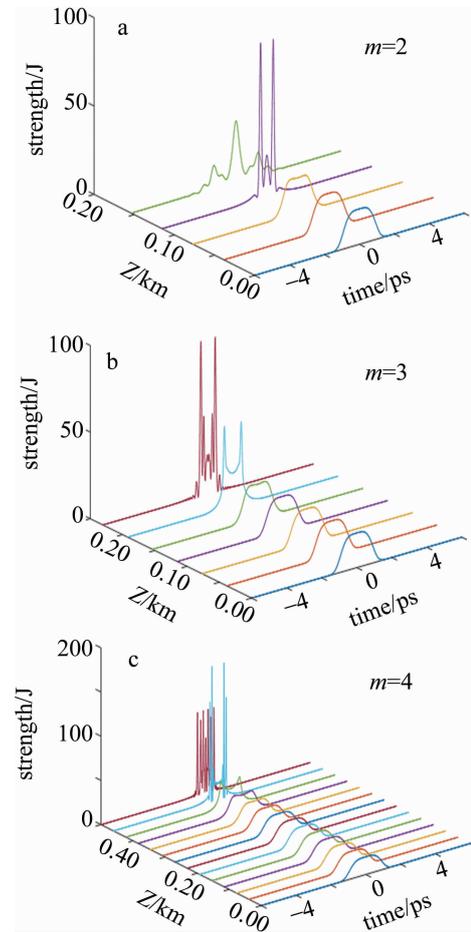


Fig. 6 Time domain characteristics of super-Gaussian pulse with initial chirp of  $-2$  when dispersion function  $m=2,3,4$

图7 是初始啁啾  $C=-2$ 、超高斯脉冲在超高斯型 DDF 陡峭程度  $m=2,3,4$  时的频谱特性。由图7 可知,脉冲传输过程中,频谱先有一个窄化的过程,随后展宽。这因为初始啁啾  $C=-2$  时与自相位调制产生的正啁啾相互抵消,净啁啾减小,使得脉冲频谱窄化。图

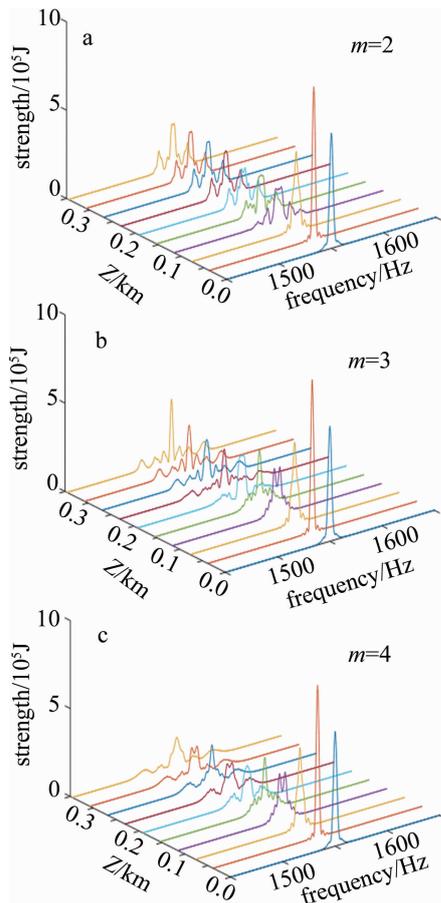


Fig. 7 Spectral characteristics of super-Gaussian pulse with initial chirp of  $-2$  when dispersion function  $m = 2, 3, 4$

7a 中所示,当脉冲传输约  $0.11\text{km}$  时出现了明显的多展宽现象,频谱发生了畸变。图 7b 中所示,当脉冲传输约  $0.225\text{km}$  时频谱有明显展宽现象。图 7c 中所示,当脉冲传输约  $0.26\text{km}$  时频谱出现展宽现象,相对较弱。由此从频谱角度分析,超高斯型 DDF 陡峭程度  $m$  的值越大,波形的畸变越小。综上所述,初始啁啾可以改变脉冲的展宽程度,初始啁啾为正时,净啁啾变大,脉冲展宽。初始啁啾为负时,净啁啾减小,脉冲窄化。超高斯型 DDF 陡峭程度  $m$  的值越大,频谱畸变程度越小,脉冲的传输特性就越好。

### 3 结论

使用分步傅里叶变换的方法对非线性薛定谔方程

进行改写,数值模拟了超高斯脉冲在超高斯型 DDF 中的演化规律,并对超高斯脉冲的传输特性进行了仿真模拟。结果表明,在时域上无论有无初始啁啾,超高斯型 DDF 的陡峭程度  $m$  越大,脉冲传输的距离越大,展宽速度越小,信号畸变越小,超高斯脉冲的传输特性就越好。在频域上无论有无初始啁啾,超高斯型 DDF 的陡峭程度  $m$  越大,频谱畸变越小,脉冲畸变越小。

### 参考文献

- [1] ZHANG Q F, GAO J. Generation of excellent self-similar pulses in a dispersion-decreasing fiber[J]. *Optik*, 2011, 122(19): 1753-1756.
- [2] AGRAWAL G. Nonlinear fiber optics [M]. 4th ed. New York: Elsevier, 2013: 47-56.
- [3] ALI R, HAMZA M Y. Propagation behavior of super-Gaussian pulse in dispersive and nonlinear regimes of optical communication systems [C]// 2016 International Conference on Emerging Technologies (ICET) 2017. New York, USA: IEEE, 2016: 1109-1121.
- [4] SUNAK H R D. Optical fiber communications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2008, 1985: 13332.
- [5] 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.
- [6] XU Y H, YE H, LING D, *et al.* Effect of initial chirp on supercontinuum generation in dispersion decreasing fibers[J]. *Optik*, 2016, 127(3): 1111-1115.
- [7] ZHONG X, LIU D, SHENG J. Long-term nonlinear propagation and damped oscillation behaviors of Gaussian and super-Gaussian pulses in optical fibers[J]. *Optik*, 2016, 127(16): 6395-6399.
- [8] 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): 5110-5112.
- [9] ZHONG D Zh, DENG T, ZOU F Y. Research on super-Gaussian pulse transmission characteristics in single-mode fiber [J]. *Optical Communication Research*, 2007, 33(2): 22-25.
- [10] WANG Y, LI Y Q. Study on the characteristics of super-Gaussian pulse without initial chirp in single-mode fiber [J]. *Optical Communication Research*, 2015, 41(1): 17-19.
- [11] LIU J H, LI H Q. Study on the broadening of chirped Gaussian pulse in DDF [J]. *Optical Communication Research*, 2008, 34(2): 41-43.
- [12] LIU J H, LI H Q, *et al.* Study on pulse broadening in dispersion decreasing fiber [J]. *Optical Communication Research*, 2007(s1): 341-342.
- [13] ZHANG J G, LI Y F, ZHAO J Q. Analysis of ultra-short optical pulse transmission characteristics based on short-time Fourier transform [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(1): 52-55 (in Chinese).