

高非线性光纤正常色散区皮秒脉冲泵浦产生的超连续谱平坦性

贾楠, 李唐军, 孙剑, 钟康平, 王目光*

(北京交通大学 光波技术研究所, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要:数值仿真研究了双曲正割、高斯($m=1$)、超高斯脉冲($m=5$)形皮秒脉冲泵浦在高非线性光纤正常色散区中时频域演化特性。计算结果表明,在峰值功率、泵浦光纤参数相同的条件下,泵浦脉冲前(后)沿陡峭程度影响频谱展宽宽度,脉冲前后沿越陡峭,生成的超连续谱带宽越宽;脉冲前(后)沿的拖尾部影响展宽频谱的平坦性,脉冲前后沿拖尾越小,生成的超连续谱频带平坦度越高。泵浦脉冲中是否含有啁啾对生成的超连续谱的带宽和平坦性影响微弱。脉冲前(后)沿拖尾小或者陡峭的脉冲在高非线性光纤正常色散区可以产生带宽平坦的超连续谱。

关键词:超连续谱;自相位调制;光波分裂;平坦性

中图分类号: O437 **文献标识码:** A

Flatness of supercontinuum generated by a picosecond pulse in normal dispersion region of highly nonlinear fiber

JIA Nan, LI Tang-Jun, SUN Jian, ZHONG Kang-Ping, WANG Mu-Guang*

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The evolutionary waveforms and spectrograms of sech, gaussian pulse ($m=1$) and supergaussian pulse ($m=5$) generated in normal dispersion region of high nonlinear fiber were numerically studied. The results indicate that the tail at both front and back edge of the pulse not only affects spectrum broadening, but also the flatness of supercontinuum. The chirp of pump pulse has little impacts on the generated supercontinuum. The pulse with high power, steep edge and small tail is preferable to generate wideband and flat supercontinuum.

Key words: supercontinuum, SPM, OWB, flatness

PACS: 42.65.-k; 42.79.Gn; 42.81.-i; 74.25.nd

引言

超连续谱是指当足够强的超短光脉冲入射到介质中时,由于介质中的线性和非线性作用,使超短光脉冲的频谱展宽到 100 THz 的极端频谱展宽现象。1976 年, C. Lin 和 R. H. Stolen 首次在光纤中生成超连续谱^[1]。随着对超连续谱的研究不断深入,超连续谱开始在光学相干层析(Optical coherence tomography, OCT)、光谱学、光学频率测量、光学传感及超短脉冲生成等领域有了新的应用^[2];尤其是 20 世纪 90 年代,超连续谱在电信上的应用引起人们极大的关注。在具有小的正色散值的色散平坦光纤的正常色散区泵浦产生的超连续谱已经被证明具有带宽大、相干度高的特性^[3-4]。这种大带宽、高相干度的超连续谱可以为混合使用波分复用、时分复用和先进调制码型等技术的超大容量干线光传输提供高重复

graphy, OCT)、光谱学、光学频率测量、光学传感及超短脉冲生成等领域有了新的应用^[2];尤其是 20 世纪 90 年代,超连续谱在电信上的应用引起人们极大的关注。在具有小的正色散值的色散平坦光纤的正常色散区泵浦产生的超连续谱已经被证明具有带宽大、相干度高的特性^[3-4]。这种大带宽、高相干度的超连续谱可以为混合使用波分复用、时分复用和先进调制码型等技术的超大容量干线光传输提供高重复

收稿日期:2014-01-13,修回日期:2015-02-05

Received date: 2014-01-13, revised date: 2015-02-05

基金项目:国家自然科学基金(61475015,60807003);北京高等学校青年英才计划项目(YETP0528);新世纪优秀人才支持计划资助(NCET-09-0209)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61475015,60807003), Beijing Higher Education Young Elite Teacher Project (YETP0528), and the Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-09-0209)

作者简介(Biography):贾楠(1982-),男,河南安阳人,博士研究生,主要研究领域为非线性光学、超高速光通信、光信号处理。E-mail: jianan919@gmail.com.

* 通讯作者(corresponding author):E-mail: mgwang@bjtu.edu.cn

频率、多波长超短脉冲光源^[5]. 但采用上述技术的通信系统不仅要求超连续谱光源具有宽带宽,高相干度;其对超连续谱光源带宽的平坦性也有严格的要求. 在光纤的正常色散区引起脉冲频谱展宽的非线性机制主要是自相位调制(Self phase modulation, SPM)和光波分裂(Optical wave breaking, OWB). 其中以 SPM 主导的频谱展宽会呈现多峰的振荡结构导致光谱不平坦^[6].

目前改善超连续谱平坦度的方法有两种,一种是设计改变产生超连续谱光纤的色散曲线^[7],另一种是通过改变泵浦脉冲的特性,使之适应产生超连续谱光纤参数特点,进而改善超连续谱的平坦性^[8-11]. 但是上述文献并没有解释清楚造成超连续谱不平坦性的本质原因. 针对此问题,本文将以广义非线性薛定谔方程为基础,通过对脉冲在光纤正常色散区中的演化过程进行数值模拟,分别从时域和频域角度分析了造成超连续谱带宽不平坦的物理机理,对如何获取大带宽,高平坦度的超连续谱提供重要的依据.

1 理论模型

光脉冲在光纤中的传输可用广义非线性薛定谔方程(General nonlinear Schrödinger equation, GNLS)来描述^[6]

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}A - \sum_{k \geq 2} \frac{i^{k+1}}{k!} \beta_k \frac{\partial^k A}{\partial T^k} = i\gamma \left\{ |A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right\}, \quad (1)$$

其中, A 表示脉冲缓变包络振幅, β_k 表示光纤的色散效应(k 表示色散阶数), α 和 γ 分别表示光纤的损耗和非线性系数, T_R 与拉曼增益有关,假定在中心频率 ω_0 附近做线性变化,该值通常的取值为 3 fs.

X-FROG 技术是一种研究超短脉冲频域和时域特性的常用技术. 通过非线性晶体的和频过程实现参考脉冲和输出脉冲的互相关,最终得到频谱随时间的演化图. 有利于分析超连续谱中各个非线性效应之间的相互作用. 具体数学形式为^[10]:

$$I(\tau, \omega) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} A(z, t) A_{\text{ref}}(t - \tau) \exp(i\omega t) dt \right|^2, \quad (2)$$

式中, $A(z, t)$ 为输出信号振幅, $A_{\text{ref}}(t - \tau)$ 为参考脉冲振幅,通常情况下常用分束镜将输入脉冲分束,并将其中一束作为参考脉冲. 文中所有光场强度都采用归一化,以 10 为底的对数表示.

2 数值模拟和分析

数值模拟所采用的参数如下:皮秒脉冲泵浦半高全宽为 1.5 ps,重复频率为 10 GHz,中心波长为 1 560 nm,位于 HNLFF 的正常色散区,峰值功率 $P_0 = 3.8$ W,无啁啾,脉冲波形首先选择双曲正割型. 所使用的高非线性光纤(Highly nonlinear fiber, HNLF)的非线性系数 $\gamma = 10 \text{ km}^{-1} \text{ W}^{-1}$,在波长 1 560 nm 处的色散参数 $\beta_2 = 0.724 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = -0.029 \text{ ps}^3/\text{km}$,光纤零色散波长为 1 598 nm. 光纤长度为 750 m.

图 1 为双曲正割脉冲随传输距离时域和频域演化图. 由图 1(a)可以看出,在脉冲随传输距离的演化过程中,脉冲宽度在初始传输阶段没有明显展宽,之后脉冲宽度随传输距离的增加迅速展宽. 图 1(b)中,脉冲随传输距离的初始阶段,脉冲频谱在 SPM 作用下展宽. 但其光谱展宽在一定距离内就已完成,之后当传输距离增加时,光谱基本不再展宽.

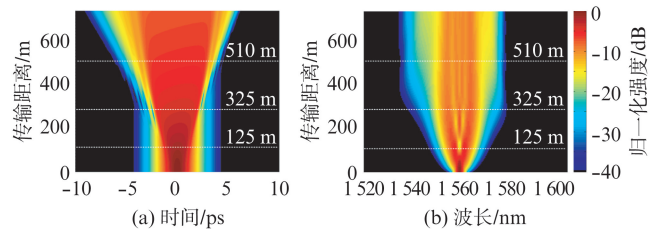


图 1 脉冲在时域和频域随传输距离的演化(a) 时域, (b) 频域

Fig. 1 Evolution of the pulse in the fiber (a) time domain, (b) frequency domain

图 2 进一步给出了脉冲在光纤 125 m、325 m、510 m、750 m 处的波形和展宽频谱图. 如图 2(a)所示,在传输的初始阶段,脉冲时域展宽不明显. 其原因是光纤的二阶色散系数较小,群速度色散(Group velocity dispersion, GVD)造成的脉冲时域展宽量十分微小. 脉冲在光纤 125 m 之后的传输中,脉冲宽度随传输距离迅速展宽,并且在光纤 325 m 处,脉冲前后沿中出现明显的时域震荡. 这是因为在正常色散区内,自相位调制下脉冲前沿产生的红移分量比脉冲后沿产生的蓝移分量传输得快, GVD 与 SPM 作用相互加强. 因此与仅由 GVD 造成脉冲展宽相比, SPM 和 GVD 同时作用下导致的脉冲展宽速度加快. 同时在传输过程中,由于高阶色散作用,脉冲波形变得不对称. 由于自陡峭效应,脉冲峰值移向后沿,造成脉冲后沿随传输距离的增加而变陡.

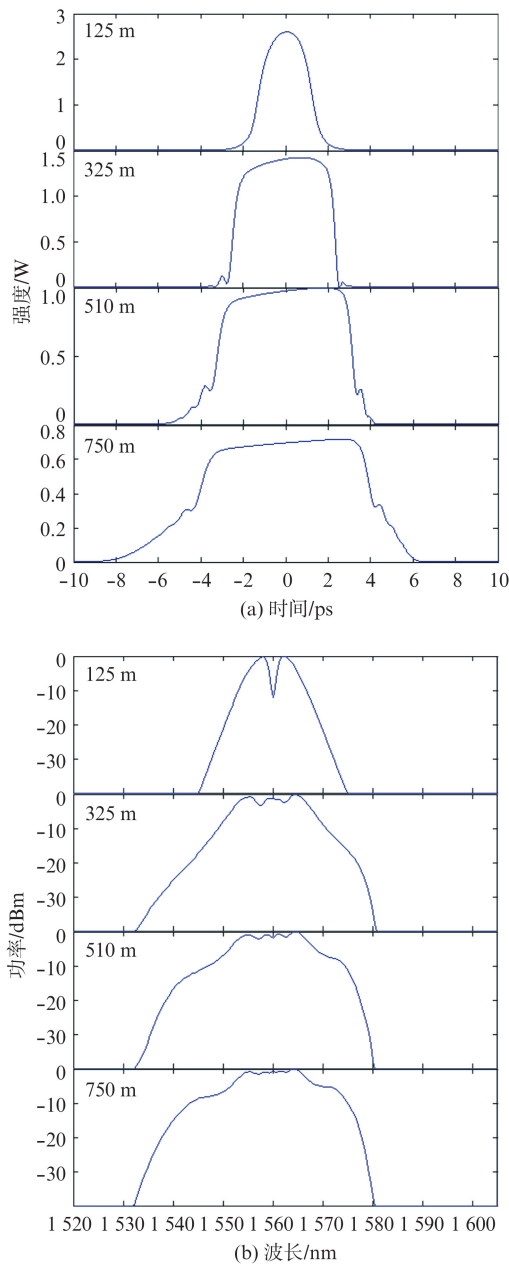


图2 脉冲在不同传输距离时的波形和展宽频谱
(a) 脉冲形状, (b) 展宽频谱

Fig. 2 Waveforms and spectrograms generated at different lengths of HNLF (a) wave shapes, (b) spectrograms

脉冲前后沿的时域震荡, 与 OWB 有关^[6]. 如图 2(b) 所示, 在光纤 125 m 处, 由于 SPM 效应, 脉冲前沿附近产生红移频率分量, 脉冲后沿产生蓝移频率分量. 当皮秒脉冲在 HNLF 中传输的过程中, 色散会使脉冲产生线性啁啾, SPM 使脉冲产生非线性啁啾. 复合后的啁啾呈现非线性特性, 因此造成脉冲的不同部位以不同的速度进行传输. 在正常色散作用下脉冲前沿附近的红移光传输较快, 超越脉冲前沿尾部(即脉冲前沿开始的部分)的非红移光, 脉冲后

沿附近的蓝移光则正好相反. 在这两种情况下, 脉冲的前后沿中各包含了两种不同频率的光, 它们之间干涉造成脉冲前后沿震荡的精细结构, 产生 OWB, 如图 2(a) 光纤 325 m 处的脉冲波形. 这种现象也可以用四波混频(Four-wave mixing, FWM)理论解释, 时域中脉冲前后沿附近的震荡和频域中频谱旁瓣是同一现象的不同表现形式^[6]. 随着脉冲在光纤中继续传输, FWM 产生的长波长处光谱旁瓣具有比脉冲前沿由 SPM 产生的红移频率分量更快的传播速度. 光谱长波长处的旁瓣对应的时域上的精细结构超越脉冲前沿尾部的非红移光, 发生 FWM 作用, 在更长波长处产生新频率, 往复循环. 直到脉冲前沿尾部处于中心波长的非红移光的能量完全转移到长波长处, 脉冲前沿的 OWB 过程结束. 同理, 当脉冲后沿尾部的非蓝移光的能量被完全转移到更短波长处时, 脉冲后沿的 OWB 过程结束. 此外, 由于脉冲的自陡峭效应造成脉冲峰值移向脉冲后沿, 导致脉冲后沿陡峭, 因此在脉冲的蓝移端有更大的频移, 导致超短脉冲 SPM 展宽频谱的不对称性.

图 3 是采用 X-FROG 技术得到的脉冲在光纤 125 m、370 m、510 m 和 750 m 处的时谱图. 与图 2 相比, 图 3 在一个图中把超连续谱的时域和频域图像联系起来, 建立清楚的对应关系, 反映脉冲能量在光纤传输过程中在时频域的分布演化. 脉冲在光纤中传输的初始阶段, SPM 主导频谱展宽, 此时的时谱形状呈现“S”形. 图 3(a) 中脉冲前沿对应频域上的红移峰, 脉冲后沿对应频域上的蓝移峰, 对应图 2(b) 所示光纤 125 m 处脉冲频谱, 图中红移峰和蓝移峰明显, 脉冲中心波长凹陷, 光谱不平坦. 泵浦中心波长凹陷的原因是, 脉冲前沿尾部、脉冲中心和脉冲后沿尾部三个不同位置具有相同中心波长之间的干涉造成. 当脉冲传输至光纤 325 m 和 510 m 处时, 图 3(b) 和 3(c) 中黄色和红色虚线分别表示脉冲前沿尾部和脉冲前沿红移分量在脉冲演化过程中时域上的位置. 从脉冲在光纤中的传输过程中可以看出, 脉冲前沿中的红移分量在传输过程中追赶上脉冲前沿尾部中心波长处的频率分量, 两个不同频率 ω_1 和 ω_2 的非线性混频产生了两个新的频率, 分别为 $2\omega_1 - \omega_2$ 和 $2\omega_2 - \omega_1$, 形成频谱的两个边带, 此现象即 FWM^[6]. 在 FWM 作用下, 脉冲前沿红移分量将脉冲前沿尾部中心波长处频率分量的能量不断转移到长波长处, 脉冲前沿尾部能量逐渐减弱. 与之对应, 处于脉冲后沿尾部中心波长处的频率分量, 被后沿蓝移分量不断转移到短波长处, 脉冲后沿尾部中

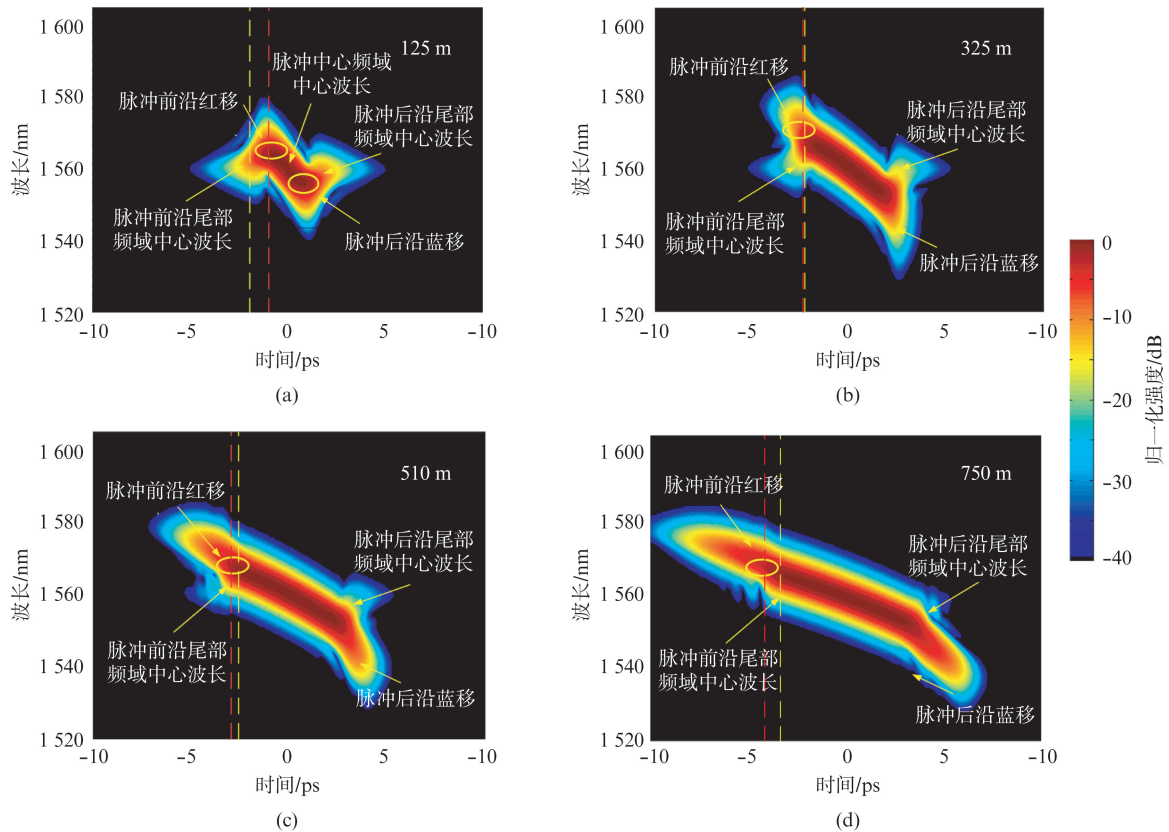


图3 脉冲在不同传输距离时的时谱图(a) 125 m, (b) 325 m, (c) 510 m, (d) 750 m

Fig. 3 Spectrograms generated in different lengths of fiber (a) 125 m, (b) 325 m, (c) 510 m, (d) 750 m

心波长的能量逐渐减弱. 与图 3(b) 对应, 图 2(b) 所示光纤 325 m 处脉冲频谱呈现出多峰的振荡结构. 相对光纤 125 m 处脉冲频谱, 其频谱中心附近振荡幅度减弱, 这是由于脉冲前后沿尾部能量减弱造成的. 脉冲在光纤 510 m 处的频谱依然呈现出典型的振荡结构, 由于脉冲前后沿尾部能量减弱, 频谱中心振荡幅度也进一步减弱; 同时在频谱的长波长和短波长处出现明显隆起的边带. 图 3(d) 所示为脉冲在光纤 750 m 处的时谱图. 此时, 脉冲(前)后沿尾部中心波长的频率分量基本上都被转移到了长波长处和短波长处, 频谱振荡幅度更加微弱, 变得更加平坦.

通过对比观察分析图 2 和图 3, 可以得到以下结论: 皮秒脉冲在 HNLF 正常色散区泵浦产生超连续谱频带中心的平坦性与处于脉冲前沿、脉冲中心和脉冲后沿不同位置的相同中心波长之间干涉作用强弱有关. 脉冲前(后)沿尾部能量越大, 脉冲前沿尾部、脉冲中心和脉冲后沿尾部三个不同位置具有相同中心波长之间的干涉越强烈, 频带中心附近振荡幅度越大, 展宽频谱越不平坦; 相反, 脉冲前(后)沿尾部能量越小, 脉冲前沿、脉冲中心和脉冲后沿三个不同位置相同中心波长分量间的干涉作用越弱,

频带中心附近振荡幅度越小, 展宽频谱越平坦.

根据以上分析, 在光纤参数相同的条件下, 对双曲正割、高斯 ($m=1$)、超高斯 ($m=5$) 形脉冲泵浦产生超连续谱进行仿真研究. 图 4 是脉冲波形分别为双曲正割、高斯 ($m=1$)、超高斯脉冲 ($m=5$) 在 HN-LF 正常色散区中不同位置处的波形和频谱展宽图. 如图 4(a) 光纤 0 m 处时域波形所示, 在相同的峰值功率下, 相对双曲正割脉冲, 高斯 ($m=1$) 形脉冲前(后)沿尾部能量较小, 具有较窄的时域基座; 对于超高斯 ($m=5$) 波形的脉冲, 其具有更加陡峭的前(后)沿, 且基本不存在尾沿. 在频域上, 双曲正割波形的脉冲频带最窄, 高斯 ($m=1$) 形脉冲的频带略宽; 超高斯 ($m=5$) 形脉冲因为具有陡峭的前(后)沿, 其频谱带宽最大. 当三种不同波形的脉冲传输至光纤 125 m 时, 双曲正割脉冲的频谱中心波长处的凹陷最大; 高斯 ($m=1$) 形脉冲频谱中心波长处的凹陷略弱; 而超高斯 ($m=5$) 形脉冲的频谱中心波长处没有凹陷. 随着脉冲在光纤中继续传输, 三种波形的脉冲的频谱继续展宽; 频谱的平坦性依然是双曲正割脉冲最差, 高斯 ($m=1$) 形脉冲频谱次之, 超高斯 ($m=5$) 形脉冲的频谱平坦性最好, 达到 1.6 dB. 并

且超高斯($m=5$)形脉冲泵浦产生的超连续谱带宽最大,如图4(b)所示.

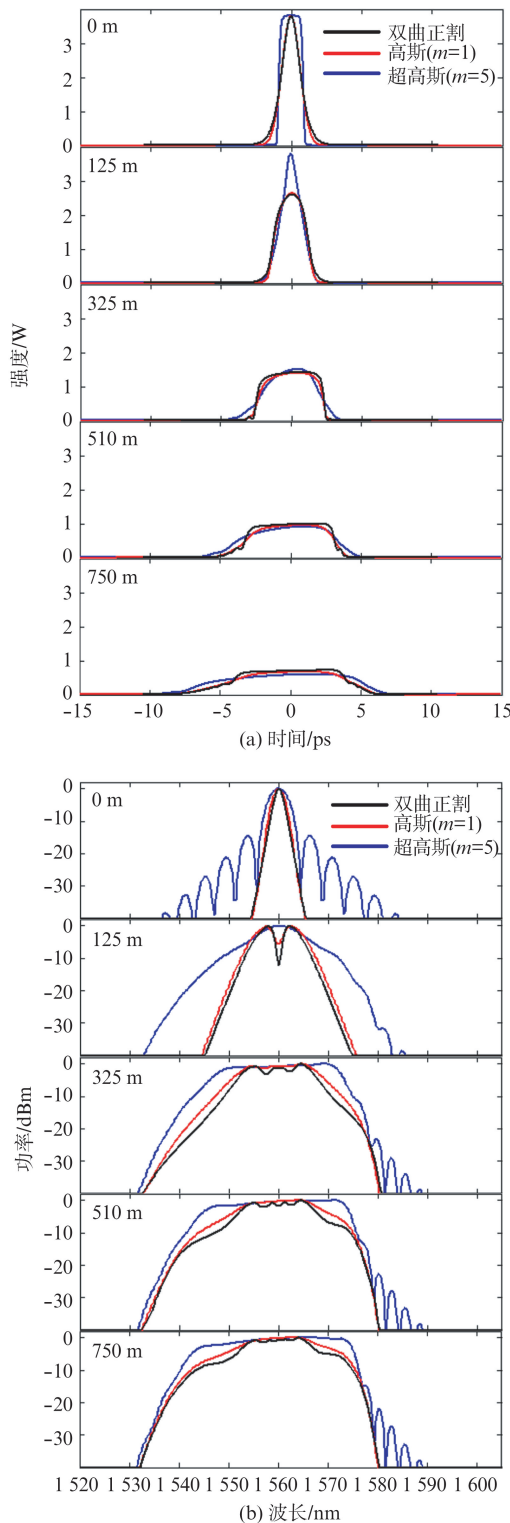


图4 双曲正割、高斯($m=1$)、超高斯脉冲($m=5$)在HNLF正常色散区不同传输距离的波形和展宽频谱(a)脉冲形状,(b)展宽频谱

Fig.4 Waveforms and spectrograms of sech, gaussian pulse ($m=1$) & super gaussian pulse ($m=5$) generated at different lengths of HNLF, (a) wave shapes, (b) spectrograms

从图4可以分析得出,前(后)沿拖尾较长的输入脉冲,如双曲正割和高斯($m=1$)脉冲,其在非线性光纤正常色散区的超连续谱生成主要由两种物理机理参与,一是脉冲中心SPM所导致的频谱展宽,二是由SPM产生的蓝移(红移)分量与脉冲前(后)沿尾部部分相互作用产生的FWM(即时域上的OWB).其中在脉冲传输的初始阶段,SPM所导致的频谱展宽占主导作用,而之后FWM作用下在使频谱进一步展宽的同时会减弱伴随SPM作用产生的频谱调制现象,最终改善频谱平坦性.对比双曲正割,高斯($m=1$)所产生超连续谱可知:在相同峰值功率和脉宽下,皮秒脉冲在HNLF正常色散区泵浦产生超连续谱的带宽由皮秒脉冲前(后)沿的陡峭程度决定.皮秒脉冲前(后)沿越陡峭,生成的超连续谱越宽.而超连续谱的平坦性主要由皮秒脉冲前(后)沿拖尾长短和其能量大小决定.初始脉冲前(后)沿拖尾越长且能量越大,伴随SPM作用产生的频谱调制越强,生成的频谱平坦性越差;相同长度的光纤下,之后FWM作用下通过转移频谱间能量进而改善频谱平坦的效果越弱.对于前(后)沿拖尾较短的输入脉冲,如超高斯($m=5$)脉冲的频谱在光纤中的演化,其在非线性光纤正常色散区的超连续谱生成则主要由SPM主导的频谱展宽,FWM作用参与的较少;但伴随SPM作用产生的频谱调制较弱,生成的超连续谱频带宽且平坦.

根据上述分析,在光纤参数相同的条件下,对超高斯($m=5$)形脉冲携带啁啾量为 $C=2$ 、 $C=0$ 、 $C=-2$ 时泵浦产生超连续谱进行仿真研究.图5是脉冲波形分别为超高斯($m=5$)脉冲携带啁啾 $C=2$ 、 $C=0$ 、 $C=-2$ 时在HNLF正常色散区不同长度处的波形和展宽频谱图.如图5(a)光纤125 m处时域波形所示, $C=-2$ 初始啁啾脉冲的峰值功率最高, $C=0$ 脉冲次之, $C=2$ 初始啁啾脉冲的峰值功率最低,这是因为在超高斯($m=5$)形脉冲在光纤传输的初始阶段,脉冲携带负啁啾($C=-2$)被HNLF中色散感应啁啾异号相互抵消,脉冲被压缩进而导致较高的峰值功率;而初始脉冲携带正啁啾($C=2$)与HNLF中色散感应啁啾同号相互加强,脉冲单调展宽且展宽速度比无初始啁啾($C=0$)脉冲的展宽速度快,进而导致相对较低的峰值功率^[6].频域上就30 dB带宽而言,初始携带正啁啾($C=2$)的脉冲带宽最宽,携带负啁啾($C=-2$)的脉冲带宽次之,无初始啁啾($C=0$)脉冲的带宽最窄.此后,随着在HNLF中传输的距离增加,不同啁啾量的脉冲在时域波形

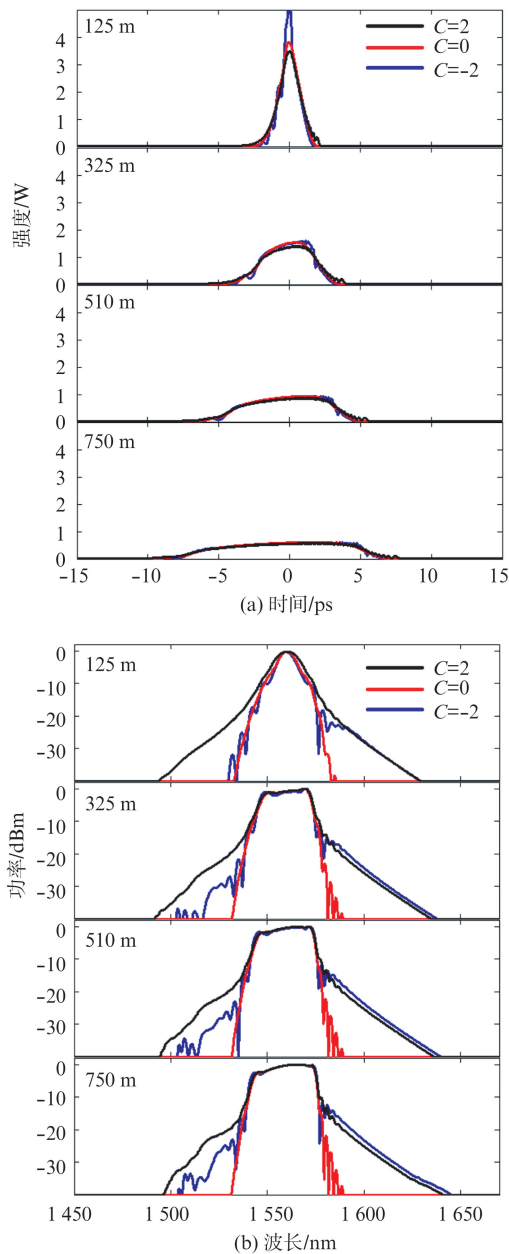


图5 超高斯($m=5$)脉冲携带啾啾 $C=2$ 、 $C=0$ 和 $C=-2$ 时在HNLF正常色散区不同传输距离的波形和展宽频谱 (a) 脉冲形状;(b) 展宽频谱

Fig.5 Waveforms and spectrograms of supergaussian pulse ($m=5$) with $C=2$, $C=0$, $C=-2$ generated at different lengths of HNLF. (a) Wave shapes, (b) spectrograms

趋近一致,如图5(a)中325 m、510 m和750 m处的时域波形所示。频域上30 dB带宽依然是携带正啾啾($C=2$)的脉冲频带宽度最宽,携带负啾啾($C=-2$)的脉冲带宽次之,无初始啾啾($C=0$)脉冲的带宽最窄。但是其10 dB带宽几乎一致,并且10 dB带宽内的平坦性也几乎一致,如图5(b)中325 m、510 m和750 m处的频谱形状所示。由此可以得出如下结论,对于携带不同啾啾量的超高斯($m=5$)脉冲

在HNLF正常色散区泵浦产生的超连续谱而言,30 dB带宽:携带正啾啾($C=2$)的脉冲带宽最宽,携带负啾啾($C=-2$)的脉冲带宽次之,无初始啾啾($C=0$)脉冲的带宽最窄;10 dB带宽:正啾啾($C=2$)、负啾啾($C=-2$)、无初始啾啾($C=0$)脉冲的带宽和平坦性几乎一致。

3 结论

对双曲正割、高斯($m=1$)、超高斯脉冲($m=5$)形以及超高斯($m=5$)形携带不同啾啾的皮秒脉冲泵浦在HNLF产生的超连续谱进行了数值研究,得到了三种波形的泵浦脉冲在光纤不同位置的时频域图。

对双曲正割、高斯($m=1$)、超高斯脉冲($m=5$)形皮秒脉冲泵浦在HNLF产生的超连续谱仿真结果表明:在脉冲峰值功率和脉宽相同、泵浦光纤参数相同的条件下,皮秒脉冲在HNLF正常色散区泵浦产生超连续谱的带宽由皮秒脉冲前(后)沿的陡峭程度决定。皮秒脉冲前(后)沿越陡峭,生成的超连续谱带宽越宽。皮秒脉冲在HNLF正常色散区泵浦产生超连续谱频带中心的平坦性与处于脉冲前沿、脉冲中心和脉冲后沿不同位置的相同中心波长之间干涉作用强弱有关。脉冲前(后)沿尾部能量越大,脉冲前沿、脉冲中心和脉冲后沿三个不同位置的相同中心波长分量间的干涉作用越强烈,频带中心附近震荡幅度越大,展宽频谱越不平坦;相反,脉冲前(后)沿尾部能量越小,在脉冲前沿尾部、脉冲中心和脉冲后沿尾部三个不同位置具有相同中心波长之间的干涉越弱,频带中心附近震荡幅度越小,展宽频谱越平坦。

对于超高斯($m=5$)形携带不同啾啾的皮秒脉冲泵浦在HNLF产生的超连续谱的仿真结果表明:30 dB带宽:携带正啾啾($C=2$)的脉冲带宽最宽,携带负啾啾($C=-2$)的脉冲带宽次之,无初始啾啾($C=0$)脉冲的带宽最窄;正啾啾($C=2$)、负啾啾($C=-2$)、无初始啾啾($C=0$)脉冲的10 dB带宽和平坦性几乎一致。因此,在光纤参数相同的条件下,要获得带宽大且带内平坦超连续谱,需要选择峰值功率高、脉冲前(后)沿陡峭且拖尾能量尽量小的脉冲作为泵浦,初始脉冲中是否携带啾啾并无太大影响。

References

- [1] Lin C, Stolen R. New nanosecond continuum for excited-

- state spectroscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 1976, **28** (4): 216 – 218.
- [2] CUI Hai-Yan, HOU Lan-Tian, HAN Ying. Generation of infrared ultra-wide band continuum spectrum with photon crystal fiber [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (崔海燕, 侯蓝田, 韩颖. 光子晶体光纤红外超宽带连续谱的研究. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(6): 445 – 447.
- [3] Xu Y Z, Ren X M, Zhang X, *et al.* Flat supercontinuum generated in a single-mode optical fibre with a new chromatic dispersion profile [J]. *Chinese Physics Letters*, 2005, **22** (8): 1923.
- [4] Xu Y Z, Ren X M, Wang Z N, *et al.* Flat supercontinuum generation at 1 550 nm in a dispersion-flattened microstructure fibre using picosecond pulse [J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, **24**(3): 734.
- [5] WU Jian, LI Yu-Hua, LOU Cai-Yun, *et al.* Ultra short pulse generation from supercontinuum source [J]. *ACTA OPTICA SINICA* (伍剑, 李玉华, 娄采云, 等. 利用超连续谱光源产生超短光脉冲. *光学学报*. 2000, **20**(3): 325 – 329.
- [6] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. 5 ed: Academic Press, 2012.
- [7] Heidt A M. Pulse preserving flat-top supercontinuum generation in all-normal dispersion photonic crystal fibers [J]. *JOSA B*, 2010, **27**(3): 550 – 559.
- [8] Hooper L E, Mosley P J, Muir A C, *et al.* Coherent supercontinuum generation in photonic crystal fiber with all-normal group velocity dispersion [J]. *Optics Express*, 2011, **19** (6): 4902 – 4907.
- [9] Cook K, George A, Wadsworth W, *et al.* Delivery of sub-100 fs pulses through 8 m of hollow-core fiber using soliton compression [J]. *Optics express*, 2007, **15** (12): 7126 – 7131.
- [10] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, **78**(4): 1135 – 1184.
- [11] Jing Q, Ma H, Huang Y, *et al.* Improved flatness and tunable bandwidth of the supercontinuum generation in all-normal dispersion-flattened PCF using Littman-Metcalf optical bandpass filter [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, **44**(6): 1660 – 1669.