

文章编号:1004-4213(2011)01-0029-7

快速数值差分递推改进算法在超宽连续谱模拟中的应用研究

邱桥飞,张冠茂,张晓萍

(兰州大学 信息科学与工程学院 现代通信技术研究所,兰州 730000)

摘 要:对快速数值差分递推公式进行了改进,使之能够求解带有脉冲自陡峭项和脉冲内喇曼散射项的非线性薛定谔方程.通过与传统孤子解析结果及分步傅里叶方法数值结果的对比分析表明,快速数值差分递推改进算法是一种快速而准确的数值计算方法,它不仅能够同步考虑光学媒质中的群速色散作用和非线性克尔作用,而且将所有高阶非线性项对光脉冲传输的影响也考虑了进去.运用该算法模拟了由于光纤非线性效应和群速色散效应共同作用所产生的超宽连续谱现象,为光学媒质中一系列非线性现象的模拟提供了新的研究思路.

关键词:快速数值差分递推改进算法;非线性薛定谔方程;超宽连续谱;脉冲自陡峭效应;脉冲内喇曼散射效应

中图分类号:TN929.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114001.0029

0 引言

超宽连续谱(Supercontinuum, SC)是指强短光脉冲通过非线性光学介质时,由于自相位调制(Self-phase Modulation, SPM)、交叉相位调制(Cross Phase Modulation, XPM)、受激喇曼散射(Stimulated Raman Scattering, SRS)和四波混频(Four-wave Mixing, FWM)等非线性效应与群速色散效应(Group Velocity Dispersion, GVD)的共同作用而使脉冲频谱展宽的一种物理现象,该物理效应是由 R. R. Alfano 和 S. L. Shapiro 于 1970 年首先发现的.迄今为止,人们已经在许多非线性光学媒质中发现了超宽连续谱现象,并对之进行了大量的理论和实验研究.随后的研究发现,光脉冲频谱展宽后的范围甚至可以从可见光一直连续扩展到紫外和红外区域.通过求解非线性薛定谔方程(Nonlinear Schrödinger Equation, NLSE)是对超宽连续谱现象进行理论分析与研究的一个很重要的方法.

作为现代物理学研究中经常遇到的各种非线性发展方程中的一种, NLSE 是研究非线性色散媒质中光脉冲传播问题的一个十分重要的基本方程.然而除了在极少数特定的色散和非线性组合的情形下可以得到它的孤子解析解外,对于输入光脉冲为任

意波形的方程的求解,仍然只能依靠各种各样的数值解法.这些数值解法大致可以分为:伪频谱法和有限差分法.目前,应用最为广泛的当属归属于伪频谱法的分步傅里叶法(Split-step Fourier Method, SSFM),该方法引入了快速傅里叶变换算法(Fast Fourier Transform, FFT),提高了计算速度.但是,由于其计算的分步过程孤立了色散效应和非线性效应,这与光媒质中二者并存且相互影响的实际情况是相矛盾的,进而导致了无法消除的误差.此外,与 SSFM 相类似,分步小波方法(Split-step Wavelet Method, SSWM)、自适应分步傅里叶法(Adaptive Split-step Fourier Method, ASSFM)以及改进的分步傅里叶法(Modified Split-step Fourier Method, MSSFM)都有各自显著的计算特点,但都是在将色散作用和非线性作用分开考虑的基础上提出的,因此依然存在 SSFM 的不足.新近提出的快速数值差分递推算法,根据光脉冲在光学媒质中传输的实际情形,同时考虑色散效应和非线性效应在同一小段传输介质中对光脉冲传输的作用,其计算速度和准确度明显高于常规使用的 SSFM.但是文献[13-14]所给出的分析结果仅考虑了一般的标准二阶非线性项,还无法处理含有自陡峭效应项和脉冲内喇曼散射效应项的最一般形式的方程.而在模拟 SC 时,待

基金项目:教育部“新世纪优秀人才支持计划”基金(No. NCET-04-0981)和兰州大学交叉学科青年创新研究基金(No. LZU 200514)资助
第一作者:邱桥飞(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤通信、非线性光脉冲传输与压缩. Email: qiuqf04@lzu.edu.cn
导师(通讯作者):张冠茂(1973-),男,副教授,主要研究方向为光通信中的非线性传输与压缩、光纤光栅传感器与光学表面等离子体共振. Email: zhanggm@lzu.edu.cn
收稿日期:2010-06-03;修回日期:2010-08-16

求解的 NLSE 必须是一般化的方程,因为方程中两个非线性项对 SC 的谱宽及变化趋势都有着比较明显的影响.为了解决此种情形下的计算问题,本文对包含有高阶非线性项的快速数值差分递推公式进行了推导,改进后的算法很好地继承了原方法计算速度快和准确度高的优点,计算实例也表明该算法能够很好地模拟 SC.

1 理论分析

1.1 改进的快速数值差分递推公式推导

理论分析表明,当输入光脉冲的宽度小于 1 ps 时,光脉冲在同时具有损耗、色散和非线性作用的光学媒质中传输时必须考虑喇曼效应和自陡峭效应,故此时应该遵循非线性薛定谔方程

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

式中, A 为 $A(z, T)$, 代表了光脉冲的慢变振幅分布. T 是以群速度 v_g 移动的延时参考系中的时间坐标, z 则是空间传输距离. a, β_k, γ 为光纤参量, 分别代表了光纤损耗因子、 k 阶色散参量以及非线性克尔效应系数. ω_0 为中心角频率也即载波角频率, T_R 则与喇曼增益谱的斜率有关. 研究表明, 方程中正比于的项与脉冲沿的自陡峭和冲击的产生有关, 而正比于 T_R 的最后一项的起因则与延迟喇曼响应有关, 对应于脉冲内喇曼散射诱发的自频移效应. 为了得到时域上改进的快速数值差分递推公式, 应先对式(1)的两边同时进行傅里叶变换, 即 $A(z, T) \xrightarrow{F} \tilde{A}(z, \omega)$, 则由傅里叶变换的性质易知

$$\frac{\partial^n A(z, T)}{\partial T^n} \xrightarrow{F} (-i\omega)^n \tilde{A}(z, \omega) \quad (2)$$

故可以得到频域表达式为

$$\frac{\partial \tilde{A}(z, \omega)}{\partial z} + \frac{a}{2} \tilde{A}(z, \omega) - \sum_{k \geq 2} \frac{i^{k+1}}{k!} (-i\omega)^k \beta_k \tilde{A}(z, \omega) = i\gamma F \left\{ |A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right\} \quad (3)$$

式(3)中的算符 F 代表对所包括的项作傅里叶正变换. 当空间步长 Δz 取很小时, 式(3)可以化为差分形式

$$\tilde{A}(z + \Delta z, \omega) = \left\{ 1 - \left[\frac{a}{2} - \sum_{k \geq 2} \frac{i^{k+1}}{k!} (-i\omega)^k \beta_k \right] \Delta z \right\} \cdot \tilde{A}(z, \omega) + i\gamma F \left\{ |A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right\} \Delta z \quad (4)$$

利用零邻域的马克劳林展开的恒等式, 同时对式(4)

右边进行变换处理可得

$$\begin{aligned} \tilde{A}(z + \Delta z, \omega) &= e^{-\left[\frac{a}{2} - \sum_{k \geq 2} \frac{i^{k+1}}{k!} (-i\omega)^k \beta_k \right] \Delta z} \tilde{A}(z, \omega) + \\ & i\gamma F \left[|A|^2 A \right] \Delta z + \frac{i\gamma}{\omega_0} \omega F \left[|A|^2 A \right] \Delta z - \\ & i\gamma T_R F \left[A \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right] \Delta z \end{aligned} \quad (5)$$

此时, 再对式(5)作傅里叶逆变换即可得到其时域表达式

$$\begin{aligned} A(z + \Delta z, T) &= F^{-1} \left\{ e^{-\left[\frac{a}{2} - \sum_{k \geq 2} \frac{i^{k+1}}{k!} (-i\omega)^k \beta_k \right] \Delta z} \tilde{A}(z, \omega) \right\} + \\ & i\gamma |A|^2 A \Delta z + \frac{i\gamma}{\omega_0} F^{-1} \left\{ \omega F \left[|A|^2 A \right] \right\} \Delta z - \\ & \gamma T_R A F^{-1} \left\{ \omega F \left[|A|^2 \right] \right\} \Delta z \end{aligned} \quad (6)$$

在差分形式下, 空间距离可记为: $z = k\Delta z, k = 0, 1, 2, 3, \dots$, 因此式(6)可以简记为

$$\begin{aligned} A_{k+1} &= h_\beta * A_k + i\gamma |A_k|^2 A_k \Delta z + \frac{i\gamma}{\omega_0} F^{-1} \left\{ \omega F \left[|A_k|^2 \right] \cdot \right. \\ & \left. A_k \right\} \Delta z - \gamma T_R A_k F^{-1} \left\{ \omega F \left[|A_k|^2 \right] \right\} \Delta z \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中的 h_β 可以理解为 Δz 距离上光纤信道在色散作用下的系统冲击响应函数, 其具体形式可以表示为

$$\begin{aligned} h_\beta &= h_\beta(\Delta z, T) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\left[\frac{a}{2} - \sum_{k \geq 2} \frac{i^{k+1}}{k!} (-i\omega)^k \beta_k \right] \Delta z} \cdot \\ & e^{-i\omega T} d\omega \end{aligned} \quad (8)$$

式(7)是改进的快速数值差分递推算算法的基本公式, 依据此方程可以对非线性光纤中的超宽连续谱进行数值计算及模拟仿真处理.

在实际计算中, 为了进一步提高计算的效率和降低计算误差, 可以将式(7)通过恒等变形进而改写为

$$\begin{aligned} A_{k+1} &= h_\beta * A_k + i\gamma |A_k|^2 A_k \Delta z + \\ & \gamma \left(\frac{2i}{\omega_0} - T_R \right) |A_k|^2 F^{-1} \left\{ \omega F \left[A_k \right] \right\} \Delta z + \\ & \gamma \left(\frac{i}{\omega_0} - T_R \right) A_k^2 F^{-1} \left\{ \omega F \left[A_k^* \right] \right\} \Delta z \end{aligned} \quad (9)$$

1.2 改进的快速数值差分递推公式与标准孤子解析解的对比分析

为了衡量光脉冲在光纤传输过程中的色散作用和非线性作用的影响比重, 常引入孤子阶数的定义

$$N^2 = L_D / L_{NL} = (\gamma P_0 T_0^2) / |\beta_2| \quad (10)$$

式中 N 为孤子阶数, $L_D = T_0^2 / |\beta_2|$ 定义为色散长度, $L_{NL} = (\gamma P_0)^{-1}$ 则定义为非线性长度. 由孤子阶数定义式可知, 通过改变非线性参量、色散参量和输入光脉冲的初始脉冲宽度 T_0 以及初始脉冲功率 P_0 就可以调节孤子阶数的大小, 进而改变色散作用和非线性作用对光脉冲传输的影响比重.

研究表明, 当输入光脉冲为双曲正割脉冲时, 可以通过改变输入脉冲宽度 T_0 和峰值功率 P_0 以使

得孤子阶数满足 $N=1$, 此种脉冲入射到理想无损耗光纤中时可以实现无畸变传输, 在任何距离处都不会改变脉冲形状. 数学分析表明, 在特定的色散和非线性条件下, 可以得到标准孤子解析解形式

$$A(\xi, \tau) = \sqrt{P_0} \operatorname{sech}(\tau) \exp(i\xi/2) \quad (11)$$

式(11)中, $\xi=z/L_D$ 为归一化光纤长度, $\tau=T/T_0$ 为归一化时间. 为了对改进的快速数值差分递推算法的计算结果与标准孤子解析解进行对比, 取光纤参

量为: 工作中心波长 $\lambda_0=1.55 \mu\text{m}$, 光纤损耗 $a=0$, 二阶色散 $\beta_2=-1 \text{ ps}^2/\text{km}$, 三阶色散 $\beta_3=0$, 非线性系数 $\gamma=1 \text{ W}^{-1}/\text{km}$, 忽略其它更高阶色散项; 同时, 为了满足孤子阶数为 $N=1$ 的条件, 取初始脉冲宽度 $T_0=1 \text{ ps}$, 初始光功率 $P_0=1 \text{ W}$. 此处为了能够与解析结果进行对比, 忽略了自陡峭效应和喇曼散射效应. 如图 1 为脉冲分别传输 100 m, 1 km, 10 km, 100 km 后的计算结果.

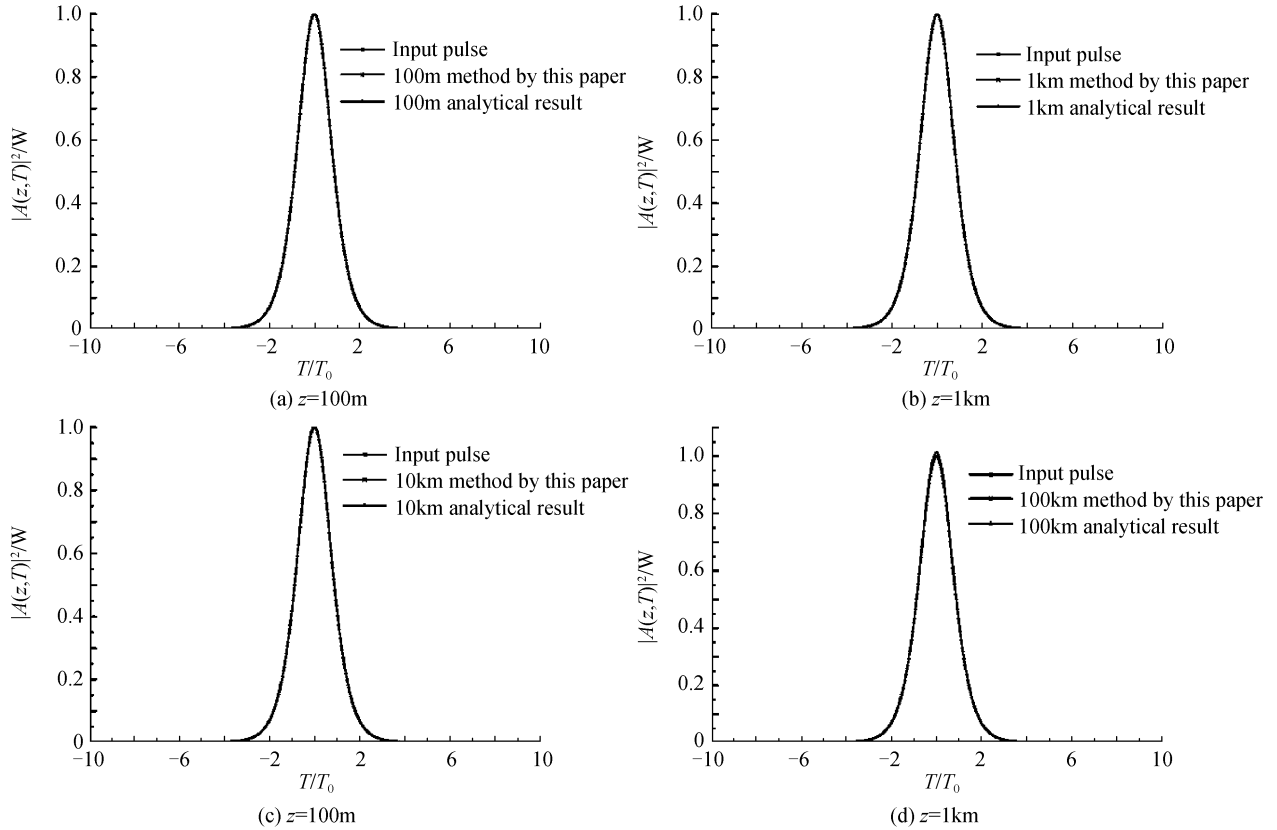


图 1 快速数值差分递推算法和标准孤子解析解计算结果对比

Fig. 1 Comparison between the calculated results by the method of rapid numerical difference recurrence algorithm and the analytical results of the soliton solution

由图 1 可以看出, 本文采用的快速数值差分递推算法的数值模拟计算曲线和标准光孤子解析结果的计算曲线符合的很好, 尤其是在本文讨论的产生超宽连续谱的传输距离范围内, 其误差小于 0.01%, 而且可以通过进一步减小计算步长的手段来降低误差. 这就说明了改进的快速数值差分递推公式能够以相当高的计算准确度应用于光纤中的光脉冲传输模拟分析.

1.3 改进的数值差分递推算法与分步傅里叶法 (SSFM) 的比较分析

取基本参量为: 脉冲宽度 $T_0=20 \text{ ps}$, 脉冲峰值功率 $P_0=10 \text{ mW}$, 光纤损耗 $a=0$, 二阶色散系数 $\beta_2=-4 \text{ ps}^2/\text{km}$, 忽略更高阶色散, 非线性系数 $\gamma=1 \text{ W}^{-1}/\text{km}$, 喇曼斜率 $T_R=3 \text{ fs}$, 中心波长取 $\lambda_0=1.558 \mu\text{m}$, 光脉冲传输距离分别取 $z=100 \text{ km}$,

200 km. 作为对比, 同时也给出了 SSFM 的计算结果, 其结果如图 2, 而计算耗时对比则如表 1.

表 1 分步傅里叶方法和改进的快速数值差分递推算法在不同采样点数下耗时对比

Table 1 Comparison of the time-consuming between the split-step Fourier method and the modified rapid numerical difference recurrence algorithm in different samples

Sampling points	128	256	512	1 024	2 048	4 096	8 192
Time consuming in SSFM/s	1.48	1.97	3.09	5.70	20.72	30.20	52.98
Time consuming in the method of this paper/s	0.98	1.36	2.19	3.96	12.38	19.65	37.25

注: 计算参量同上所述, 传输距离选 100 km; 运行的计算机环境为: 操作系统为 Windows XP, CPU 为 Pentium(R)4 3.0 GHz, 内存为 2 GB.

由图 2 可见, 本文提出的改进的快速数值差分递推算法和 SSFM 算法的结果相比, 二者的相对误

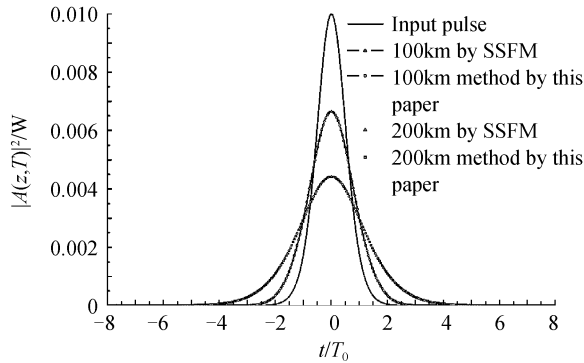


图2 改进的快速数值差分递推算法和分步傅里叶算法(SSFM)得到的脉冲在无损耗常规光纤中分别非线性传输 100 km, 200 km 后的波形对比

Fig. 2 Waveform comparison of the optical pulse transmission in the lossless SMF fiber with nonlinearity at the distances of 100 km, 200 km by using the modified rapid numerical difference recurrence algorithm and the Split-step Fourier method (SSFM) respectively

差在 0.03% 以内, 这个结果与文献[14]的计算结果一致, 值得一提的是本文的计算结果是在加入自陡峭项和喇曼散射项之后得到的。

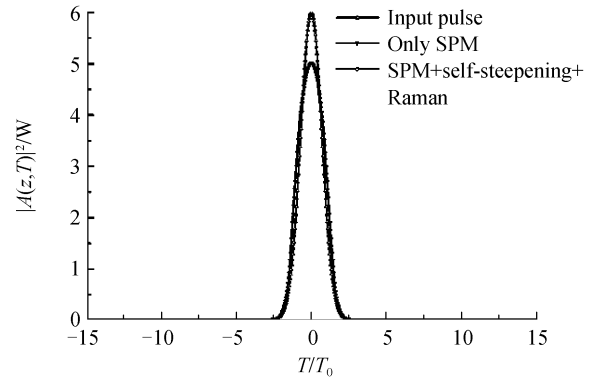
本文方法与 SSFM 方法计算所耗费的时间对比参见表 1 数据。由表中的数据对比可知, 本文所给出的方法耗时几乎仅为传统 SSFM 方法耗时的三分之二, 这种计算上的优势随着光纤长度和采样点数的增加将进一步得以体现。结合图 1, 图 2 和表 1 的结果, 说明本文所述方法能够准确而快速地求解带有自陡峭项和喇曼散射项的非线性薛定谔方程, 并以此来模拟光脉冲在非线性光纤中的传输过程。

2 超宽连续谱计算实例分析

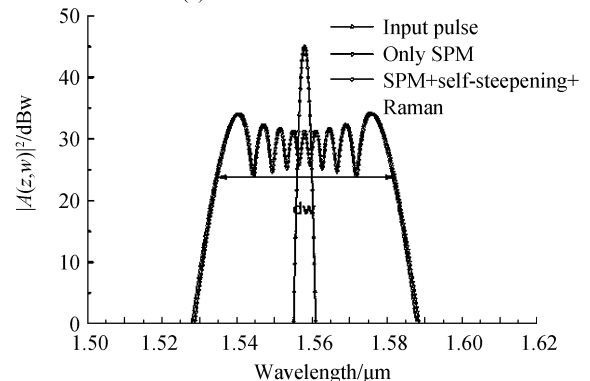
2.1 运用改进的快速数值差分递推公式数值模拟超宽连续谱的有效性验证

为了验证本文提出的改进的快速数值差分递推公式(7)对超宽连续谱模拟的有效性, 计算实例中选取了与文献[17]相同的光纤参量和输入脉冲参量, 以此作对比分析。考虑输入脉冲波形为 $\text{sech}^2(\tau)$, 具体计算参量设置为: 输入光脉冲半高全宽为 $T_{\text{FWHM}} = 2.5 \text{ ps}$, 输入脉冲功率 $P_0 = 6 \text{ W}$, 光纤的二阶色散系数 $\beta_2 = 0.15 \text{ ps}^2/\text{km}$, 三阶色散系数 $\beta_3 = 0 \text{ ps}^3/\text{km}$, 四阶色散系数 $\beta_4 = 2 \times 10^{-4} \text{ ps}^4/\text{km}$, 忽略五阶及五阶以上色散。非线性系数 $\gamma = 34.5 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$, 喇曼斜率为 $T_R = 3 \text{ fs}$, 光纤损耗 $\alpha = 0$, 中心工作波长为 $\lambda_0 = 1.558 \text{ }\mu\text{m}$, 传输距离取为 150 m。运用 MATLAB 编程运算处理后得到的计算结果如图 3。

由图 3 结果对比文献[17]可知, 本文方法数值模拟得到的超宽连续谱拥有 9 个波峰, 谱宽接近于 48 nm, 这与文献中使用 SSFM 得到的结果吻合得



(a) Waveforms in time domain



(b) Spectrum distribution

图3 皮秒级泵浦脉冲下光子晶体光纤中的超宽连续谱分析
Fig. 3 Spectral analysis of supercontinuum in the photonic crystal fiber (PCF) pumped by the picosecond optical pulse

很好, 从而进一步说明改进的快速数值差分递推算法可以有效地应用于超宽连续谱的数值计算和模拟仿真。值得注意的是, 当输入脉冲大于 1 ps 时, 在考虑到脉冲内喇曼散射效应和自陡峭效应后, 得到的时域脉冲和超宽连续谱只存在很不明显的变化, 这也进一步验证了方程(1)在运算过程中, 当输入脉冲大于 1 ps 时, 喇曼散射效应和自陡峭效应的作用是可以忽略不计的。

2.2 运用改进的快速数值差分递推公式讨论超宽连续谱的产生

关于光子晶体光纤中超宽连续谱的实验研究, 国内外相关研究机构已做了许多的工作, 但对于方程中各非线性项作用机理的研究并不多见。本文从非线性薛定谔方程出发, 利用改进的快速数值差分递推公式对其各非线性项因素的作用做一些探讨。主要针对的对象是自相位调制、自陡峭效应和脉冲内喇曼散射效应对超宽连续谱的影响。选用高斯脉冲作为输入脉冲, 脉冲的半高全宽取为 $T_{\text{FWHM}} = 0.5 \text{ ps}$, 输入脉冲功率取为 $P_0 = 15 \text{ W}$, 二阶色散参量取为 $\beta_2 = -0.15 \text{ ps}^2/\text{km}$, 忽略三、四阶及更高阶群速度色散, 因为高阶色散对超宽连续谱产生的影响完全可以忽略不计。此处非线性系数取为 $\gamma = 25 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$, 传输距离仍取为 150 m, 其余参量则

保持不变. 模拟计算的结果参见图 4~图 6.

图 4 所示为只考虑自相位调制和同时考虑自相位调制和自陡峭效应作用下的超宽连续谱对比图. 对比图 4(a)中时域脉冲可以看出,自相位调制条件下的脉冲是对称的,而加入自陡峭效应后,峰值脉冲向后延移动,使得脉冲前沿包络更加陡峭,也就导致了脉冲包络变得不对称.而图 4(b)的频谱图则显示自陡峭效应使自相位调制下的超宽连续谱得到了进一步的展宽,虽然这种展宽幅度较小,但是其作用却使得到的频谱变得不对称.其中,频谱的不对称可以理解为是自陡所致的脉冲形变所引起的.

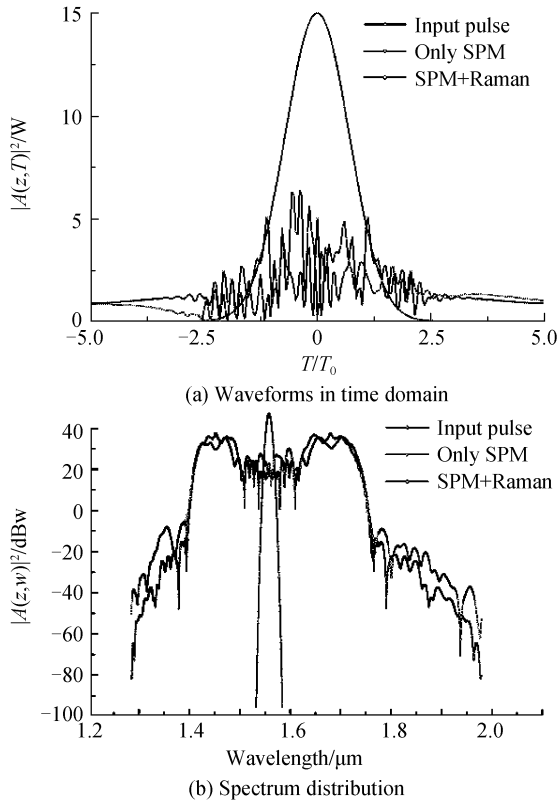


图 4 自陡峭效应对光子晶体光纤中超宽连续谱的影响
Fig. 4 Effect on supercontinuum in photonic crystal fiber (PCF) by self-steepening

图 5 所示为只考虑自相位调制和同时考虑脉冲内喇曼散射效应作用下的超宽连续谱对比图. 研究表明,脉冲内喇曼散射效应对超宽连续谱的影响主

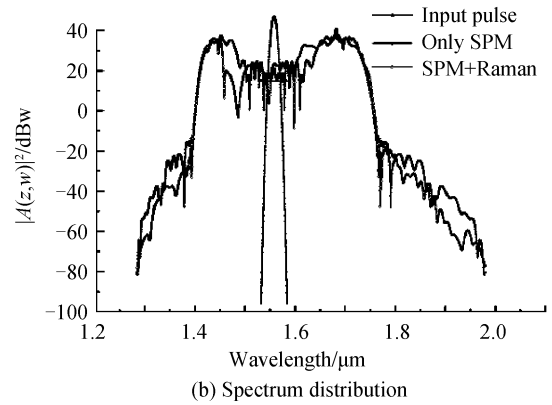
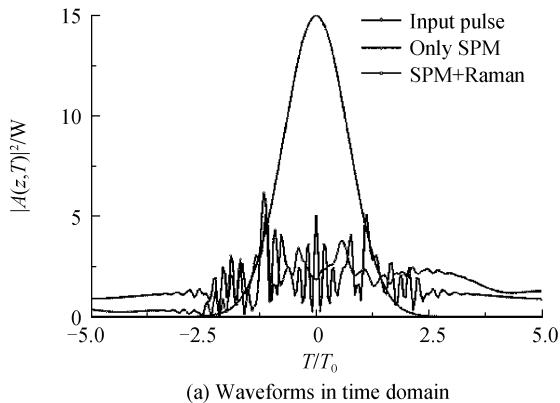


图 5 脉冲内喇曼散射效应对光子晶体光纤中超宽连续谱的影响

Fig. 5 Effect on Supercontinuum in photonic crystal fiber (PCF) by intrapulse Raman scattering

要集中在长波长边,即使得频谱的长波长边产生更多新的频率,而对短波长一边则影响较小.对比图 4(b)频谱图可知,当考虑喇曼散射效应后,超宽连续谱的长波长一边变得比以前更加平坦,而短波长一边的变化则很细微,这一现象也正好验证了前一说法.所以,喇曼散射的加入也导致了超宽连续谱的不对称,只是伴随着这种不对称,频谱变得更加平坦了.

图 6 所示为只考虑自相位调制与同时考虑自相

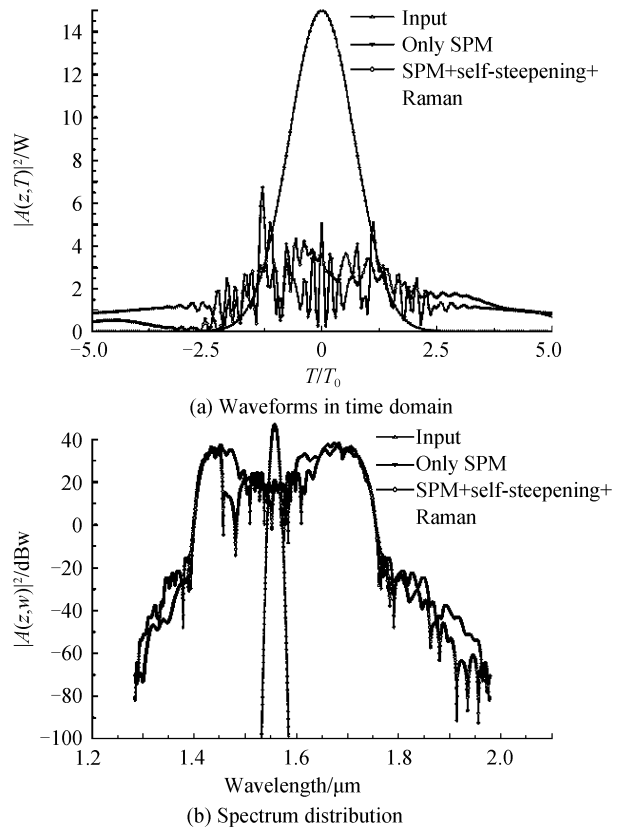


图 6 自相位调制、自陡峭效应及脉冲内喇曼散射效应共同作用下对光子晶体光纤中超宽连续谱的影响
Fig. 6 Effect on Supercontinuum in photonic crystal fiber (PCF) by self-phase modulation, self-steepening effect and intrapulse Raman scattering effect

位调制、自陡峭效应及脉冲内喇曼散射效应作用下的超宽连续谱的时、频域对比图. 对比图 6(a)的时域脉冲可以看出, 自相位调制所产生的脉冲是关于脉冲中心对称, 而自陡峭效应以及脉冲内喇曼散射效应导致脉冲包络分布的不对称, 其脉冲前沿包络呈现明显的自陡而脉冲后沿包络则变得趋缓. 对比图 6(b)的频谱分布, 可以看出加入自陡峭效应和脉冲内喇曼散射效应后, 频谱得到了一定程度的展宽, 但是这种展宽的幅度相对较小, 此外频谱出现了分布的不对称, 其频谱顶部长波长一侧也表现出一定程度的平坦化. 基于此, 可知光纤传输中的自相位调制和群速度色散作用是导致超宽连续谱产生的主要原因, 而自陡峭效应以及脉冲内喇曼散射效应则使得频谱分布不对称化, 并在局部对其中心频谱分布平坦化具有一定的改善作用.

3 结论

研究表明, 快速数值差分递推算法能够同时考虑光学媒质的色散作用和非线性克尔作用, 利用其求解非线性薛定谔方程, 在计算速度和准确度方面都具有较大的优势. 本文针对超宽连续谱分析所需, 对该方法进行了改进, 使其在继承了原有快速数值差分递推算法优势的同时, 又能够很好地求解带有自陡峭项和脉冲内喇曼散射项的非线性薛定谔方程. 将该公式应用于计算实例, 使其在特殊的色散和非线性条件下, 与已知的孤子解析解以及分步傅里叶方法的数值解进行了对比, 验证了该改进公式能够很好地模拟脉冲在光纤中的传输. 运用该法处理了短光脉冲在光子晶体光纤中传输的超宽连续谱, 验证了改进的快速数值差分递推算法的有效性, 同时证明了皮秒级输入脉冲的超宽连续谱中的自陡峭效应和喇曼散射效应的影响甚微, 基本上可以忽略不计. 本文通过改变输入光脉冲参量以及光纤系统的参量探讨了自陡峭效应和脉冲内喇曼散射效应对超宽连续谱的影响, 结果表明自相位调制和群速度色散联合作用是产生超宽连续谱的主要因素, 而自陡峭效应和喇曼散射效应则是导致超宽连续谱呈现不对称分布的主要原因, 同时喇曼散射能够使产生的超宽连续谱顶部更加平坦化. 文中提出的快速数值差分递推改进算法同样适用于其他非线性光学现象的模拟分析, 该项研究也为此类工作提供了新的处理思路.

参考文献

- [1] ALFANO R R, SHAPIRO S L. Emission in the region 4000 to 7000 Å via four-photon coupling in glass[J]. *Phys Rev Lett*, 1970, **24**(11): 584-587.
- [2] BRODEUR A, CHIN S L. Band-gap dependence of the ultrafast white-light continuum[J]. *Phys Rev Lett*, 1998, **80**(20): 4406-4409.
- [3] RANKA J K, WINDELER R S, STENTZ A J, *et al.* Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm[J]. *Opt Lett*, 2000, **25**(1): 25-27.
- [4] COEN S, CHAU A H L, LEONHARDT R, *et al.* White-light supercontinuum generation with 60-ps pump pulses in a photonic crystal fiber[J]. *Opt Lett*, 2001, **26**(17): 1356-1358.
- [5] YAN Pei-guang, RUAN Shuang-chen, DU Chen-lin, *et al.* Supercontinuum generation in photonic crystal fiber pumped by femtosecond pulse. *Acta Photonic Sinica*, 2003, **32**(11): 1299-1301.
- [6] LI Xiao-qing, ZHANG Shu-min, LI Dan, *et al.* Experimental and numerical study of supercontinuum generation in photonic crystal fiber. *Acta Photonic Sinica*, 2008, **37**(9): 1805-1809.
- [7] ORTIGOSA-BLANCH A, KNIGHT J C, RUSSELL P St J. Pulse breaking and supercontinuum generation with 200-fs pump pulses in photonic crystal fibers[J]. *JOSA B*, 2002, **19**(11): 2567-2572.
- [8] YAMAMOTO T, KUBOTA H, KAWANISHI S, *et al.* Supercontinuum generation at 1.55 μm in a dispersion-flattened polarization-maintaining photonic crystal fiber [J]. *Opt Express*, 2003, **11**(13): 1537-1540.
- [9] GOVIND P A. Nonlinear fiber optics[M]. 4th ed. Beijing: World Publishing Corporation, 2009: 40-41, 131, 133, 470-471.
- [10] CHEN Hong-ping, WANG Jian, HE Guo-guang. Split-step wavelet method for numerical simulation of optical pulse propagation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(6): 2779-2783.
- [11] LI Shu-guang, XING Guang-long, ZHOU Gui-yao, *et al.* Adaptive split-step Fourier method for simulating ultrashort laser pulse propagation in photonic crystal fibres[J]. *Chinese Physics*, 2006, **15**(2): 437-443.
- [12] RAO Min, SUN Xiao-han, ZHANG Ming-de. A modified split-step Fourier method for optical pulse propagation with polarization mode dispersion[J]. *Chinese Physics*, 2003, **12**(5): 502-506.
- [13] ZHANG Guan-mao, ZHANG Xiao-ping. Rapid numerical difference recurrent formula of nonlinear Schrödinger equation and its application optics communications[J]. *Optics Communications*, 2007, **270**: 379-383.
- [14] ZHANG Guan-mao, ZHANG Xiao-ping. Study on the rapid numerical difference recurrence algorithm for the simulation of optical pulse propagation and its application [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(5): 2678-2683.
- [15] DEMARTINI F, TOWNES C H, GUSTAFSON T K, *et al.* Self-steepening of light pulses[J]. *Phys Rev*, 1967, **164**(2): 312-323.
- [16] GRISCHKOWSKY D, COURTENS E, ARMSTRONG J A. Observation of self-steepening of optical pulses with possible shock formation[J]. *Phys Rev Lett*, 1973, **31**(7): 422-425.
- [17] SAITOH K, KOSHIBA M. Highly nonlinear dispersion-

- flattened photonic crystal fibers for supercontinuum generation in a telecommunication window[J]. *Opt Express*, 2004, **12**(10): 2027-2032.
- [18] JIANG Guang-yu, WAN Sheng-peng, WANG Qing, *et al.* Numerical simulation of supercontinuum generation in high nonlinear fiber pumped at the normal dispersion region[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2009, **38**(7): 1784-1789.
江光裕, 万生鹏, 王庆, 等. 高非线性光纤正常色散区产生超宽连续谱的数值研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(7): 1784-1789.
- [19] JIA Dong-fang, DING Yong-kui, HU Zhi-yong, *et al.* Studies on the mechanism of supercontinuum generation in fiber[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2004, **15**(5): 612-616.
贾东方, 丁永奎, 胡志勇, 等. 光纤中超连续谱产生机理研究[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(5): 612-616.

Modified Rapid Numerical Difference Recurrence Algorithm and Its Application in the Simulation of Supercontinuum

QIU Qiao-fei, ZHANG Guan-mao, ZHANG Xiao-ping

(*Institute of Modern Communication Technology, School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: A new modified form of the rapid numerical difference recurrence formula was proposed to calculate the nonlinear Schrödinger equation, with ites of the pulse self-steepening and the intrapulse Raman scattering. Compared with the traditional analytical results of solitons and the solutions of Split-step Fourier method, the results show that the modified rapid numerical difference recurrence algorithm is a fast and precise numerical method, which takes into account simultaneously both the effects of the chromatic dispersion and the nonlinear Kerr effect together along each fiber segment, and the effects of all the higher-order nonlinear items of the optical medium. By using this method, it was validated successfully to simulate the supercontinuum generated as a result of the optical fiber nonlinear effects and the group velocity dispersion effects together. The formula was proved that it can provide some new ideas of research for the simulation of the other nonlinear phenomena in the optical medium.

Key words: Modified rapid numerical difference recurrence algorithm; Nonlinear Schrödinger equation; Supercontinuum; Pulse self-steepening effect; Intrapulse Raman scattering effect