

文章编号: 0258-7025(2009)08-2046-06

利用改进的分步傅里叶算法模拟超连续谱的产生

崔秀艳¹ 赵建林¹ 杨德兴¹ 李鹏¹ 赵卫² 王屹山²

¹ 西北工业大学理学院光信息科学与技术研究所, 陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072
² 中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710068

摘要 为提高模拟超连续谱(SC)产生的精度,在不增加计算量的情况下对传统分步傅里叶算法作了一定的改进。传统分步傅里叶算法只考虑初始脉冲中心频率对应的色散系数,而超连续谱的光谱范围很大,当色散系数随波长变化较大时,传统算法会存在较大误差。改进的算法将整个脉冲包络看成由多个单一频率分量组成,对各频率分量分别处理,从而将整个脉冲包络内所有频率分量的色散系数都考虑在内。将改进算法分别用于模拟色散曲线只包含一个和两个零色散点的光子晶体光纤(PCF)中超连续谱的产生,并与传统算法的模拟结果相比较,结果表明,改进算法在模拟单零色散光子晶体光纤中超连续谱产生时优势不明显,但对模拟双零色散光子晶体光纤中超连续谱产生却有一定优势。

关键词 非线性光学;光子晶体光纤;超连续谱;分步傅里叶算法

中图分类号 O437; TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093608.2046

Simulation of Supercontinuum Generation by Using Modified Split-Step Fourier Algorithm

Cui Xiuyan¹ Zhao Jianlin¹ Yang Dexing¹ Li Peng¹ Zhao Wei² Wang Yishan²

¹ Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Institute of Optical Information Science and Technology, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

² State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710068, China

Abstract In order to improve the precision of simulated supercontinuum (SC) generation, the split-step Fourier algorithm is modified without increasing the computation amount. Traditional algorithm only refers to the dispersion coefficient of the central frequency. Due to the wide range of the supercontinuum, the error of the result would be big by using the traditional algorithm if the slope of the dispersion coefficient is large. According to the modified algorithm, the pulse could be regarded as the combination of many elements each with only one frequency. The elements with different frequencies could be processed separately by using the modified algorithm, so the dispersion coefficients of all the frequencies could be referred to. The modified algorithm is applied in simulating the supercontinuum generation in the photonic crystal fibers with one and two zero dispersion wavelengths. And the results are compared with those of traditional algorithm. The simulation results show that the superiority of the modified split-step Fourier algorithm is not obvious in the photonic crystal fibers (PCF) with only one zero dispersion wavelength, but having certain superiorities in simulating the supercontinuum generation of the photonic crystal fibers with two zero dispersion wavelengths.

Key words nonlinear optics; photonic crystal fiber; supercontinuum; split-step Fourier algorithm

收稿日期: 2008-06-27; 收到修改稿日期: 2008-09-08

基金项目: 瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金资助项目。

作者简介: 崔秀艳(1982—),女,硕士研究生,主要从事光子晶体光纤中超连续谱方面的研究。E-mail:cui543@163.com

导师简介: 赵建林(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事光信息技术及应用方面的研究。

E-mail:jlzhao@nwpu.edu.cn

1 引言

光子晶体光纤(PCF)又称多孔光纤或微结构光纤,是由英国科学家 J. C. Knight 等^[1]利用光子晶体的原理于 1996 年研制成功的一种新型光纤。PCF 的出现,极大地促进了超连续谱(supercontinuum, SC)的研究^[2~4]。超连续谱是超短激光脉冲在介质中传输时由于介质的非线性效应导致脉冲光谱被极大加宽的现象^[5],其出射光谱中产生很多新的频率成分,一般光谱展宽可达几十到几百纳米^[6~9],甚至可覆盖整个可见光到红外区域^[10]。

超连续谱产生可以由光纤中脉冲传输的非线性薛定谔方程描述。该方程在一般情况下无法得到解析解,故通常采用数值求解。最常用的算法是分步傅里叶算法。传统的分步傅里叶算法近似用脉冲中心波长(频率)所对应的色散系数和非线性系数来代替整个脉冲包络内的色散系数和非线性系数。当脉冲频谱展宽范围较小或色散曲线较平坦时,这种近似是有效的,但是当光谱展开得很宽或色散曲线不平坦时,这种计算所带来的误差就会很大。李曙光等^[11]提出了一种自适应分步傅里叶算法,该算法考虑了脉冲峰值对应的中心波长随传输距离的变化,然后用变化后的中心波长所对应的色散系数和非线性系数进行下一步计算,在一定程度上提高了计算精度。

本文在上述算法的基础上,提出一种考虑整个脉冲包络内所有频率分量色散系数的算法,用于超连续谱产生的数值求解,并将该算法得到的结果与传统算法的结果进行了对比,数值模拟结果表明该算法是有效的。

2 算法的改进

激光脉冲在光纤中传输所满足的非线性薛定谔方程^[12, 13]为

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \sum_{n=2} \beta_n(\omega) \frac{i^{n-1}}{n!} \frac{\partial^n A}{\partial T^n} + \frac{\alpha(\omega)}{2} A = i\gamma(\omega) \times \left[|A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right], \quad (1)$$

其中 A 为脉冲包络的慢变振幅; $\gamma(\omega)$ 为非线性系数; $\alpha(\omega)$ 为光纤的吸收损耗(这里暂不考虑光纤的吸收损耗,即假设 $\alpha(\omega) = 0$); ω_0 为脉冲中心频率; T_R 为非线性响应函数的一次矩,当脉宽 T_0 远大于 10 fs 时一般取 3~5 fs; $\beta_n(\omega)$ 为 n 阶色散系数,其中二阶色散系数 $\beta_2(\omega)$ 可由色散参量 D 计算得到,高

阶色散系数可由 $\beta_2(\omega)$ 得到,其关系为

$$D = \frac{-2\pi c}{\lambda^2} \beta_2, \quad (2)$$

$$\beta_n(\omega) = \left(\frac{d^{n-2} \beta_2}{d\omega^{n-2}} \right)_\omega \quad (n \geq 3), \quad (3)$$

为了说明分步傅里叶算法,将(1)式改写为 $\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A$,其中 \hat{D} 为差分算符,表示线性介质的色散和吸收; \hat{N} 为非线性算符,决定了脉冲传输过程中光纤的非线性效应。 \hat{D} 和 \hat{N} 可分别表示为

$$\hat{D} = - \sum_{n=2} \beta_n(\omega) \frac{i^{n-1}}{n!} \frac{\partial^n}{\partial T^n} - \frac{\alpha(\omega)}{2}, \quad (4)$$

$$\hat{N} = i\gamma(\omega) \left[|A|^2 + \frac{i}{\omega_0} \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right]. \quad (5)$$

根据傅里叶变换的微分性质,在频域内用 $(i\omega)^n$ 代替微分算符 $\partial^n / \partial T^n$,于是可将分步傅里叶算法表示为

$$A(z+h, T) \approx \exp(h\hat{N}) \times F^{-1} \{ \exp[h\hat{D}(i\omega)] F[A(z, T)] \}, \quad (6)$$

其中 F 为傅里叶变换, F^{-1} 为逆傅里叶变换, h 为空间步长。

传统分步傅里叶算法中,常用脉冲中心波长所对应的色散系数 $\beta_n(\omega_0)$ 和非线性系数 $\gamma(\omega_0)$ 分别作为整个脉冲包络内的色散系数和非线性系数的近似。在 Matlab 中将 $\beta_n(\omega_0)$ 与 $(i\omega)^n$ 相乘,此时认为各频率分量的色散系数均为 $\beta_n(\omega_0)$ 。当光谱展宽范围很大或色散曲线变化较快^[14]时,由该算法得到的计算结果会存在较大误差,此时需要对这种算法进行改进。

由于 PCF 的非线性系数随波长的变化较小,且光谱展宽范围有限,因而在计算中可以将非线性系数随波长的变化忽略,只考虑色散系数随波长的变化。

分步傅里叶算法的特点是将色散项和非线性项分开考虑,即考虑非线性项时不考虑色散项的影响,考虑色散项时不考虑非线性项的影响。当不考虑非线性项时,(1)式可简化为

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \sum_{n=2} \beta_n(\omega) \frac{i^{n-1}}{n!} \frac{\partial^n A}{\partial T^n} + \frac{\alpha(\omega)}{2} A = 0. \quad (7)$$

对(7)式做傅里叶变换,可得

$$\frac{\partial \tilde{A}}{\partial z} + \sum_{n=2} \beta_n(\omega) \frac{i^{n-1}}{n!} (i\omega)^n \tilde{A} + \frac{\alpha(\omega)}{2} \tilde{A} = 0, \quad (8)$$

式中 \tilde{A} 为 A 的傅里叶变换。在频域,整个脉冲包络可分解成一系列单一频率分量,每个单一频率分量

满足(8)式。为了进行数值计算,根据抽样定理^[15]对脉冲抽样。于是,脉冲包络内频率点数是有限的,

这些频率分量应满足方程组

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{A}_1}{\partial z} + \sum_{n=2} \beta_n(\omega_1) \frac{i^{n-1}}{n!} (i\omega_1)^n \tilde{A}_1 + \frac{\alpha(\omega_1)}{2} \tilde{A}_1 = 0 \\ \frac{\partial \tilde{A}_2}{\partial z} + \sum_{n=2} \beta_n(\omega_2) \frac{i^{n-1}}{n!} (i\omega_2)^n \tilde{A}_2 + \frac{\alpha(\omega_2)}{2} \tilde{A}_2 = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial \tilde{A}_m}{\partial z} + \sum_{n=2} \beta_n(\omega_m) \frac{i^{n-1}}{n!} (i\omega_m)^n \tilde{A}_m + \frac{\alpha(\omega_m)}{2} \tilde{A}_m = 0 \end{cases}, \quad (9)$$

其中 m 为脉冲包络内离散化的频率分量数目,(9)式可表示成一个矩阵方程

$$\frac{\partial [\tilde{A}_1(\omega_1), \tilde{A}_2(\omega_2), \dots, \tilde{A}_m(\omega_m)]^T}{\partial z} + \left[\sum_{n=2} \beta_n(\omega_1) \frac{i^{n-1}}{n!} (i\omega_1)^n \tilde{A}_1, \sum_{n=2} \beta_n(\omega_2) \frac{i^{n-1}}{n!} (i\omega_2)^n \tilde{A}_2, \dots, \sum_{n=2} \beta_n(\omega_m) \frac{i^{n-1}}{n!} (i\omega_m)^n \tilde{A}_m \right]^T + \left[\alpha_1(\omega_1) \tilde{A}_1, \alpha_2(\omega_2) \tilde{A}_2, \dots, \alpha_m(\omega_m) \tilde{A}_m \right]^T = 0. \quad (10)$$

改进的分步傅里叶算法对色散项的计算是基于(10)式得到的,这样计算得到的结果考虑了脉冲包络内各频率分量的色散系数,因此比传统算法的模拟结果精度更高。

初始脉冲频率带宽的选择应根据输出超连续谱的光谱范围来选择。当输出光谱到达光谱范围的边界时则说明选择的初始带宽较小,此时应该增大初始频率带宽。当计算量一定时,若带宽选择过大,由抽样定理可知,计算量较大;若带宽选择过小,则不同频率的光谱会发生混叠,模拟结果将有失可靠性。因此在模拟计算过程中,应通过观察输出光谱,合理选择初始脉冲的带宽范围。

3 非线性系数随波长变化对超连续谱产生的影响

在改进算法中,只考虑色散系数随波长的变化,不考虑非线性系数随波长的变化。图1为不同波长对应的非线性系数对超连续谱产生的影响,其中图1(a)为时域的脉冲波形,图1(b)为脉冲频谱。图中实线为采用820 nm波长处非线性系数 $[131/(W \cdot km)]$ 计算得到的结果,虚线为采用950 nm处非线性系数 $[101/(W \cdot km)]$ 计算得到的结果。

由图1结果可看出,无论在时域还是频域,非线性系数随波长的变化对超连续谱产生的影响都很小,因此可以近似用抽运脉冲中心波长处的非线性系数代替整个脉冲频谱内的非线性系数。下面在不考虑非线性系数随波长变化的情况下,对不同色散特性PCF中超连续谱的产生进行模拟分析。

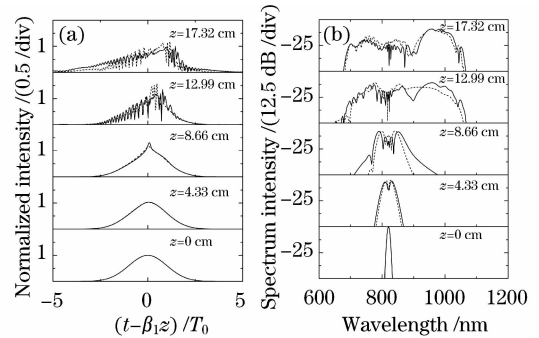


图1 不同非线性系数对超连续谱产生的影响
(a) 时域; (b) 频域

Fig. 1 Influence of different nonlinear coefficients on supercontinuum generation. (a) temporal domain; (b) frequency domain

4 不同色散特性光子晶体光纤中两种算法的对比

4.1 单零色散

假设所选PCF的色散曲线只包含一个零色散点,其结构参数及抽运脉冲参数为:空气孔直径 $d = 0.99 \mu m$,空气孔间距 $\Lambda = 2.2 \mu m$,纤芯直径 $r = 3.41 \mu m$,PCF背景材料折射率 $n = 1.45$,抽运脉冲中心波长 $\lambda_0 = 1000 \text{ nm}$,初始脉冲宽度 $T_0 = 100 \text{ fs}$,峰值功率 $P_0 = 1000 \text{ W}$,传输距离 $z = 34.56 \text{ cm}$ 。

图2为利用频域有限差分法^[16]计算得到的单零色散PCF的色散曲线。由色散曲线得到该PCF的零色散点为971.5 nm,对应抽运脉冲中心波长处的二阶色散系数 $\beta_2 = -3.4705 \text{ ps}^2/\text{km}$,三阶色散系数 $\beta_3 = 6.5161 \times 10^{-2} \text{ ps}^3/\text{km}$,四阶色散系数 $\beta_4 =$

$-7.0161 \times 10^{-5} \text{ ps}^4/\text{km}$ 。此外,由频域有限差分法计算出抽运脉冲中心波长处的非线性系数 $\gamma = 22/(\text{W} \cdot \text{km})$ 。

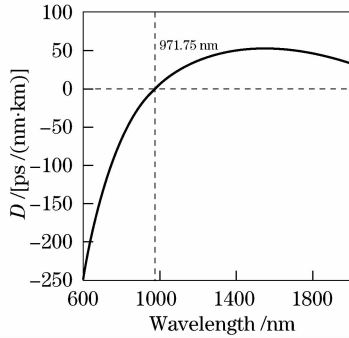


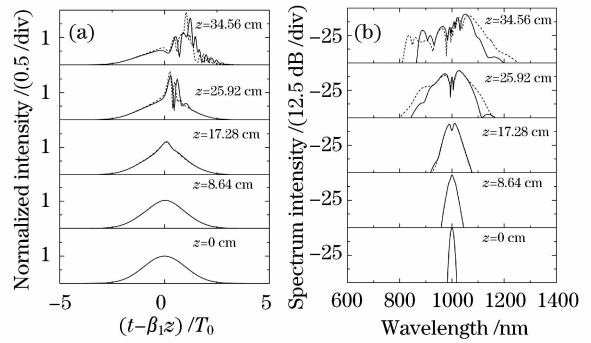
图 2 单零色散 PCF 的色散曲线

Fig. 2 Dispersion profile of the PCF with only one zero dispersion wavelength

图 3 给出了由两种算法得到的模拟结果。图中虚线为传统算法的结果,实线为改进算法的结果。可以看出,在时域中,改进算法与传统算法相比,所得到的脉冲传输速度有所减慢。这是由于抽运脉冲中心波长处于光纤的反常色散区,二阶色散系数为负,频率越低则传输速度越慢。随着传输距离的增大,光谱红移量增大。当不考虑色散系数随波长的变化时,色散系数为常数,可将不同波长处的色散系数都用脉冲中心波长处的色散系数代替,此时由传统算法得到的较低频率分量(红移量)的传输速度比实际速度快,从而表现出在时域中由传统算法得到的速度比由改进算法得到的大。

在频域中,由于抽运脉冲中心波长位于光纤的反常色散区,光谱红移分量远离零色散波长,二阶色散系数随波长的增大而减小,绝对值增大,对应的二阶色散长度减小,导致在同样的光纤长度内色散对脉冲的影响显著,相应的非线性效应的影响减小,因而由改进算法得到的结果中光谱红移量减小。自相位调制导致光谱对称展宽,光谱也会向短波方向扩展,进入光纤的正常色散区。在光纤的正常色散区,频谱展宽主要是自相位调制的作用,且正常色散区不利于光谱的展宽,传统算法中正常色散区的色散系数也是用处于反常色散区的中心波长的色散系数代替,所以由传统算法得到的光谱蓝移量比由改进算法得到的光谱蓝移量要大。

模拟结果表明,改进算法对模拟单零色散 PCF 中超连续谱的产生优势不明显,因此,在单零色散 PCF 中仍可以用传统算法模拟超连续谱的产生。



3 单零色散 PCF 中两种算法的对比。(a) 时域; (b) 频域
Fig. 3 Comparison of the two algorithms in the PCF with only one zero dispersion wavelength (a) temporal domain; (b) frequency domain

4.2 双零色散

假设所选 PCF 的色散曲线中包含两个零色散点,其结构参数^[17]和抽运脉冲参数为:空气孔直径 $0.57 \mu\text{m}$,空气孔间距 $1.0 \mu\text{m}$,纤芯直径 $1.4 \mu\text{m}$,PCF 背景材料折射率 1.45,抽运脉冲中心波长 820 nm ,初始脉冲宽度 100 fs ,峰值功率 1000 W ,传输距离 17.32 cm 。

图 4 为利用频域有限差分法计算得到的色散曲线,其中两个零色散点分别为 789.8 nm 和 956.5 nm 。两个零色散点之间是光纤的反常色散区,两个零色散点以外是正常色散区,而抽运脉冲中心波长处于光纤的反常色散区。由色散曲线可得到对应抽运脉冲中心波长的色散系数为 $\beta_2 = -2.3084 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = 2.2260 \times 10^{-2} \text{ ps}^3/\text{km}$, $\beta_4 = 1.0361 \times 10^{-4} \text{ ps}^4/\text{km}$, $\beta_5 = -4.8104 \times 10^{-7} \text{ ps}^5/\text{km}$, $\beta_6 = 1.9249 \times 10^{-9} \text{ ps}^6/\text{km}$, $\beta_7 = -7.0732 \times 10^{-12} \text{ ps}^7/\text{km}$ 。由频域有限差分法计算出对应抽运脉冲中心波长的非线性系数 $\gamma = 131/(\text{W} \cdot \text{km})$ 。

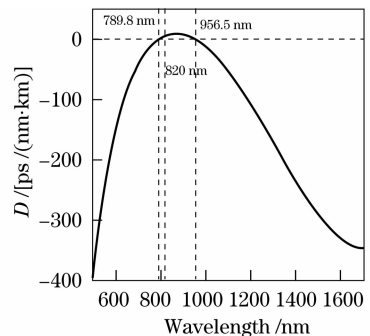


图 4 双零色散 PCF 的色散曲线

Fig. 4 Dispersion profile of the PCF with two zero dispersion wavelengths

由于两个零色散点相距较近且抽运脉冲中心波长处于两个零色散点之间,当光谱展宽后,部分光谱

会进入正常色散区,因此,如果仍然用反常色散区的色散系数代替所有频谱分量的色散系数,模拟结果就会出现较大偏差。图 5 所示为由两种算法得到的模拟结果,图中虚线为传统算法的结果,实线为改进算法的结果。

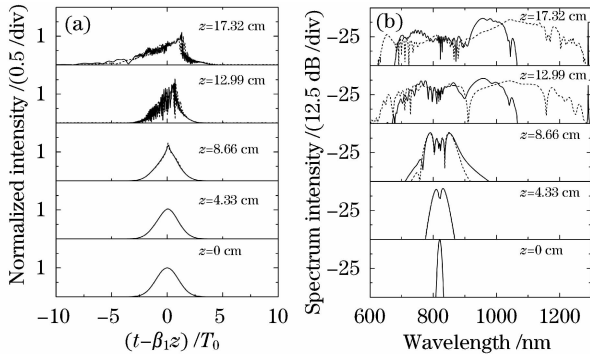


图 5 双零色散 PCF 中两种算法的对比(a) 时域; (b) 频域
Fig. 5 Comparison of two algorithms in the PCF with two zero dispersion wavelengths (a) Temporal domain; (b) frequency domain

由于抽运脉冲中心波长处于光纤的反常色散区,在色散与非线性的共同作用下,将发生高阶孤子分裂,从时域计算结果可以看出,由传统算法得到的结果中,脉冲分裂更严重。这是因为传统算法中各频率分量的二阶色散系数都是用处于反常色散区中心波长处的二阶色散系数代替,而改进算法中,处于正常色散区光谱分量的二阶色散系数为正,在正常色散区主要是自相位调制导致频谱展宽,所以正常色散区脉冲分裂较弱。从频域计算结果来看,自相位调制的作用使脉冲频谱对称展宽,但由于自陡和脉冲内拉曼效应的影响,频

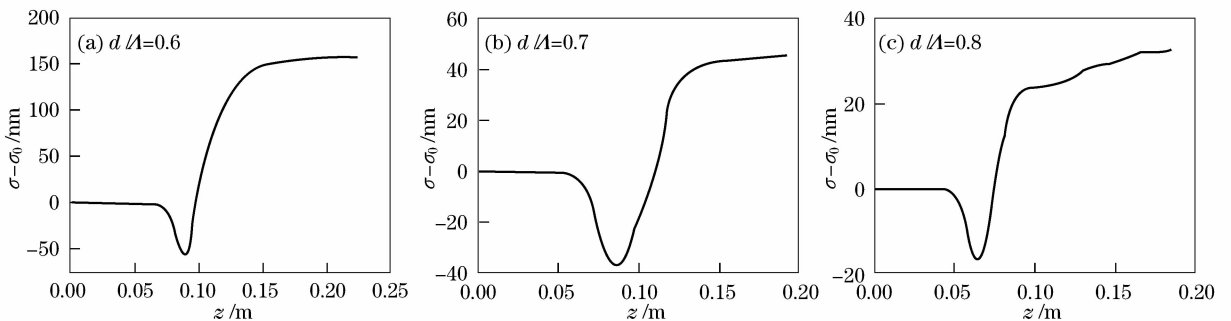


图 7 3 种结构双零色散 PCF 中两种算法得到的光谱宽度差

Fig. 7 Difference of spectral width between the two algorithms in three kinds PCF with two zero dispersion wavelengths

5 结 论

提出了一种考虑整个脉冲包络内所有频率分量色散系数的改进分步傅里叶算法,通过对单零色散和双零色散 PCF 中超连续谱产生特性的分析表明,

谱发生红移。当频谱超出两个零色散点之外时,光谱进入光纤的正常色散区,而正常色散区不利于光谱的展宽,所以由改进算法得到的结果中频谱展宽范围明显减小。由此可见,在模拟双零色散 PCF 中超连续谱的产生时,采用传统算法会出现较大误差,而改进算法精度较高。

图 6 给出了另外 3 种结构双零色散 PCF 的色散曲线,其中 d/Λ 分别为 0.6, 0.7, 0.8。图 7 为在这 3 种双零色散 PCF 中,由两种算法计算得到的超连续谱的光谱均方根宽度差随传输距离的变化,其中 σ 为由改进算法得到的光谱均方根宽度, σ_0 为由传统算法得到的光谱均方根宽度。由图 7 可以看出,当双零色散 PCF 的两个零色散点相距较近时,两种算法得到的光谱均方根宽度差较大,这表明利用传统算法模拟双零色散 PCF 中超连续谱产生时,两个零色散点越近,则模拟结果误差越大。

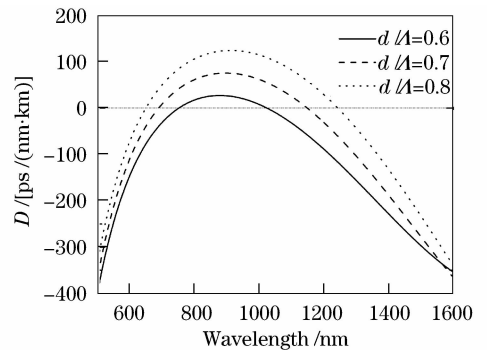


图 6 3 种结构双零色散 PCF 的色散曲线
Fig. 6 Dispersion profiles of three kinds PCF with two zero dispersion wavelengths

利用该算法模拟单零色散 PCF 中超连续谱的产生与传统算法的结果差异不大。但对于双零色散 PCF,由于色散曲线很不平坦,两个零色散点之外二阶色散系数变号,模拟结果显示传统算法存在较大

误差,而改进算法则较精确。此外,改进算法基本不会增加计算量,所以该算法用于模拟超连续谱的产生方便可行。

参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell *et al.*. All silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19):1547~1549
- 2 K. Saitoh, M. Koshiba. Highly nonlinear dispersion-flattened photonic crystal fibers for supercontinuum generation in a telecommunication window[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(10):2027~2032
- 3 B. A. Cumberland, J. C. Travers, S. V. Popov *et al.*. 29 W high power CW supercontinuum source[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(8):5954~5962
- 4 G. Genty, M. Lehtonen, H. Ludvigsen. Spectral broadening of femtosecond pulses into continuum radiation in microstructured fibers[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(20):1083~1098
- 5 Han Wen. Study of the mechanism and control of supercontinuum generation in photonic crystal fibers [D]. Changsha: Hunan University, 2006. 1~8
韩文. 光子晶体光纤中超连续谱产生的机制及控制研究[D]. 长沙:湖南大学, 2006. 1~8
- 6 J. M. Dudley, G. Genty, S. Coen. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2006, **78**(4):1135~1184
- 7 T. Schreiber, T. V. Andersen, D. Schimpf *et al.*. Supercontinuum generation by femtosecond single and dual wavelength pumping in photonic crystal fibers with two zero dispersion wavelengths[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(23):9556~9569
- 8 Zhang Jun, Wei Zhiyi, Wang Zhaohua *et al.*. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber by femtosecond pulses laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4):511~512
张军,魏志义,王兆华等. 利用光子晶体光纤产生超连续飞秒激光光谱[J]. 光学学报, 2003, **23**(4):511~512
- 9 Hu Minglie, Wang Qingyue, Li Yanfeng *et al.*. Supercontinuum generation and transmission in a random distorted microstructure fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5):567~569
- 10 胡明列,王清月,栗岩峰等. 非均匀微结构光纤中超连续光的产生和传输[J]. 中国激光, 2005, **31**(5):567~569
- 11 G. Genty, M. Lehtonen, H. Ludvigsen. Enhanced bandwidth of supercontinuum generated in microstructured fibers [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(15):3471~3480
- 12 Li Shuguang, Zhou Guiyao, Xing Guanglong *et al.*. Numerical simulation on ultrashort laser pulses propagating in microstructure fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(4):1599~1606
李曙光,周桂耀,邢光龙等. 微结构光纤中超短激光脉冲传输的数值模拟[J]. 物理学报, 2005, **54**(4):1599~1606
- 13 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bing *et al.*. Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 27~35
阿戈沃. 非线性光纤光学[M]. 贾东方,余震虹,谈斌等译. 北京:电子工业出版社, 2002. 27~35
- 14 Shi Shunxiang, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. Nonlinear optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003. 414~417
石顺祥,陈果夫,赵卫等. 非线性光学[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2003. 414~417
- 15 Wu Ming, Liu Hairong, Huang Dexiu. Dispersion property in highly nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3):539~542
吴铭,刘海荣,黄德修. 高非线性光子晶体光纤色散特性的研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(3):539~542
- 16 Hu Guangshu. Digital Signal Processing Theory, Algorithms and Realization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. 117
胡广书. 数字信号处理理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社, 2003. 117
- 17 Zhang Xiaojuan. Numerical simulation and analysis of photonic crystal fiber propagation characteristics [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. 10~14
张晓娟. 光子晶体光纤传输特性的数值模拟分析[D]. 西安:西北工业大学, 2007. 10~14
- 18 H. Zhang, S. Yu, J. Zhang *et al.*. Effect of frequency chirp on supercontinuum generation in photonic crystal fibers with two zero-dispersion wavelengths[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(3):1147~1154