

孤子色散管理传输及其在常规光纤通信中的可行性研究*

汪仲清, 万鹏, 赖昌

(重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065)

摘 要:从描述光纤中孤子脉冲传输的非线性薛定谔(NLS)方程出发,利用对称分步傅里叶方法对方程进行数值求解.研究了色散管理孤子(DMS)在常规光纤中的传输演化特性,分析了色散管理孤子在常规光纤通信系统中的可行性.结果表明,孤子在通过密集周期性搭配具有相反色散系数的光纤中传输,可以降低孤子间的相互作用,使得孤子的传输演化特性得到改善.利用色散管理来对常规光纤中光孤子脉冲之间的相互作用加以抑制,从而提高信息传输的比特率,但必须具有特殊的光纤制造工艺.

关键词:色散管理孤子;传输特性;非线性薛定谔方程;分步傅里叶法;光孤子通信

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

0 引言

随着互联网的高速发展,传统光通信方式的传输速度越来越跟不上需要,迫切需要通过新途径来提高传输速率.利用光纤介质的自相位调制(SPM)和群速度色散(GVD)相互平衡而形成的光孤子^[1]进行通信是一种好的通信方式,这种方式的优点是孤子形状不发生变化,可以进行长距离大容量通信,缺点是对系统的要求比较高,加之光纤的损耗等因素使得在实际中很难达到 SPM 和 GVD 的完全平衡.由于光纤的色散使得光脉冲在传输过程中不断展宽,从而造成了光脉冲之间严重的码间干扰,大大增加了误码率,进而影响了光纤孤子通信系统的性能.为了解决这个问题,1995 年 Knox、Forysiak 和 Doran 将色散管理的概念引入光孤子通信系统中^[2],提出了 SMF+DCF+EDFA(单模光纤+色散补偿光纤+掺铒光纤放大器)的色散管理孤子传输框架,基本解决了传统孤子通信系统的问题,奠定了色散管理孤子的基础.色散管理孤子是一种周期性分布式补偿方案,在实际中就是通过周期性的搭配具有相反色散系数的光纤,让整个传输线路上的平均 GVD 非常小.依照色散管理长度与放大间距的关系,色散管理孤子又可以分为经典色散管理下的管理孤子与密集型色散管理下的管理孤子^[3],其中经典色散管理指的是放大间距小于或者等于色散管理周期的情况,密集型色散管理(或称之为短周期模

式管理)是指色散管理周期远小于放大间距的情况.由于色散管理孤子通信具有提高信噪比^[4]、减小孤子间的相互作用^[5]、克服四波混频效应等优点,引起了国内外的广泛关注,进行了大量的研究工作^[6-9].本文从描述光纤中孤子脉冲传输的非线性薛定谔(NLS)方程出发,利用求解光脉冲传输方程的分步傅里叶变换法,数值计算和模拟色散管理孤子在常规光纤中的传输特性,进而对实际光纤通信中色散管理孤子的演化规律及其可行性进行分析.

1 色散管理孤子传输的数学模型

众所周知,色散管理是通过适当地配置具有相反色散性质的光纤来降低整个传输线路的平均色散,以改善光脉冲的传输性能.其中最重要的群速度色散(GVD)是 z 的函数,即沿着光纤长度方向变化.对于脉冲半宽度 $T_0 > 5\text{ps}$ 的光孤子脉冲在单模光纤中的传输演化可由如下的非线性薛定谔方程来描述^[10]

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

式中 $A(z, t)$ 为脉冲包络振幅, $T = t - z/v_g$ 是以群速度 v_g 移动的参照系中的时间变量, $\beta_2(z)$ 是色散管理链路中对应光纤段的群速色散, $\alpha(z)$ 是对应光纤的损耗, $\gamma(z)$ 表示非线性效应.

为了数值计算方便,常常对方程(1)作归一化处理,令归一化时间 $\tau = T/T_0 = (t - z/v_g)/T_0$, 即归一化时间是以光脉冲初始半宽度为度量单位的时间间隔; $A(z, \tau) = \sqrt{P_0} u(z, \tau) e^{-\alpha z/2}$, P_0 为入射脉冲的峰值功率, u 为孤子脉冲的归一化振幅,指数因子代表光纤的损耗;归一化距离 $\xi = z/L_D$, $L_D = T_0^2/|\beta_2|$ 为

* 重庆市科委自然科学基金(CSTC, 2006BB2361)资助

Tel: 023-62461207 Email: wangzhq@cqupt.edu.cn

收稿日期: 2007-03-01

色散长度,则归一化距离是以光纤色散长度为度量单位的空间距离.则方程(1)可表示为

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{d(\xi)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + N^2 e^{-\alpha_D \xi} |u|^2 u = 0 \quad (2)$$

式中 $d(\xi) = -\beta_2 / |\beta_2|$, 为归一化周期色散系数,它是 ξ 的周期函数,即 $\beta_2 = (\beta_2' l' + \beta_2'' l'') / (l' + l'')$, l' 和 l'' 分别为传输光纤和一个色散补偿周期内色散补偿光纤(DCF)的长度, β_2' 和 β_2'' 分别为传输光纤和色散补偿光纤的群速度色散系数. $N^2 = L_D / L_{NL}$, $L_{NL} = 1 / (\gamma P_0)$ 为非线性长度, N 为正数时称为孤子的阶数, $N=1$ 为一阶或基阶孤子, $N \geq 2$ 为高阶孤子. 为了将重点放在研究色散对孤子传输的影响,假设光纤的损耗由中间放大器提供的增益抵消,因此暂不考虑光纤的损耗,故令 $\alpha = 0$, 并且光纤的色散和非线性起同等重要的作用,即 $N=1$. 所以色散管理孤子传输可以用下面的修正非线性薛定谔方程表示

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{2} d(\xi) \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + |u|^2 u = 0 \quad (3)$$

采用对称分步 Fourier 方法数值求解方程(3), 则光孤子脉冲在 $\xi + \Delta \xi$ 处的归一化振幅为^[10]

$$u(\xi + \Delta \xi, \tau) \approx \exp\left(\frac{\Delta \xi \hat{D}}{2}\right) \exp\left[\int_{\xi}^{\xi + \Delta \xi} \hat{N}(\xi') d\xi'\right]$$

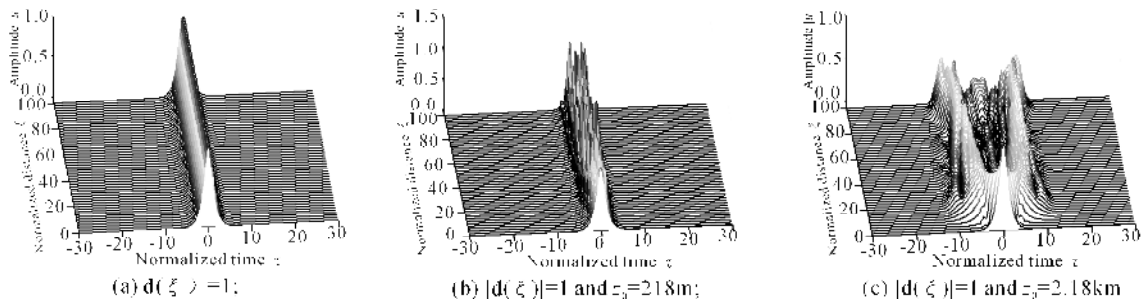


图1 色散系数 $d(\xi)$ 取不同管理周期时单孤子的传输演化

Fig. 1 Single-soliton evolution in the fiber with dispersion coefficient managed different period z_0

在色散管理孤子光纤传输系统中,光纤的色散周期性地变化. 如果通过配置光纤,让奇数段和偶数段光纤的群色散系数相反,并且周期长度相同,使得整个线路的平均色散值为零. 每段光纤的归一化色散系数 $|d(\xi)| = 1$ 时,单孤子传输演化如图 1(b)–(c)所示. 图 1(b)是色散管理周期为 0.2 个色散长度(每段光纤长度为 109 m)时单孤子的演化情况,它的振幅值发生了波动,随着孤子在光纤中传输,它的振幅宽度也有所变化. 图 1(c)是色散管理周期为 2 个色散长度(每段光纤长度为 1.09 km)时单孤子的演化情况. 可以看出,在几个色散长度内单孤子脉冲就分裂成了两个脉冲;随着光脉冲在光纤中传输,在两脉冲之间又有一些小脉冲在形成,如果是两孤子或多孤子,这种情况会造成孤子间干扰,对于信息传输是不利的. 这是因为光孤子只能在负色散光纤中

$$\exp\left(\frac{\Delta \xi \hat{D}}{2}\right) u(\xi, \tau) \quad (4)$$

式中 $\hat{D} = \frac{1}{2} d(\xi) \frac{\partial^2}{\partial \tau^2}$, $\hat{N}(\xi) = i |u|^2$, 在下面的计算中将式(4)作为研究色散管理孤子在光纤中传输演化特性的依据.

2 常规光纤中孤子色散管理传输演化仿真

2.1 单孤子的传输

若孤子脉冲的半宽度为 5 ps, 对于标准的 G. 652 光纤而言,在 1.55 μm 波长处的色散小于 18 ps/nm \cdot km, 则 $\beta_2 \approx -23 \text{ ps}^2/\text{km}$, 色散长度 $L_D = T_0^2 / |\beta_2| \approx 1.09 \text{ km}$. 假设在光纤的输入端注入一个光孤子,它可以表示为

$$u(0, \tau) = \text{sech } h(\tau) \quad (5)$$

取光纤总长度 ξ 为 100 个色散长度(相当于 109 km), 合理地选取步长 $\Delta \xi$ 的值, 代入式(4)中进行数值模拟, 当忽略损耗并且色散系数 $d(\xi) = 1$ 时, 它的传输演化如图 1(a), 可以看出孤子在光纤中平稳地传输, 它的形状和振幅都没有变化.

才能稳定地传输, 由于色散管理光纤的色散是正负交替变化, 当脉冲在正色散光纤部分传输时, 虽然在光纤的某些地方孤子脉冲宽度被压缩, 但是光孤子的传输就变得不稳定. 图 2 分别是图 1(a)–(b)两种情况光脉冲的振幅峰值随传输距离的变化, 孤子在色散系数 $d(\xi) = 1$ 的负色散光纤中传输时, 归一化振幅无变化; 当孤子在色散管理光纤中传输时, 归一化振幅峰值在 1 上下出现了较大的波动. 由此可见, 常规光纤的色散管理(特别是色散周期较大的情况)并不是理想的光脉冲信息传输系统.

2.2 三孤子的传输

在实际通信中, 通常会遇到类似“……010010011111111111110010111……”的数据, 光纤中的光脉冲可能是三个或多个孤子一起在光纤中传输, 孤子间的相互作用就有可能使系统产生比较大

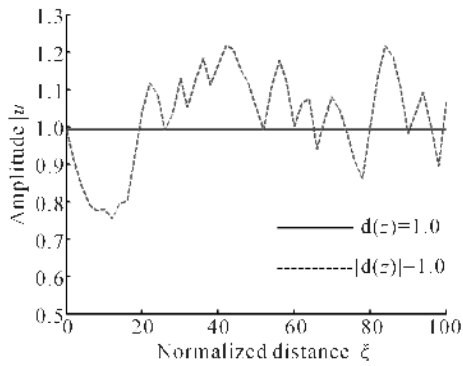


图2 色散管理孤子振幅峰值随归一化距离的变化
Fig. 2 Amplitude of single-soliton in dispersion managed fiber varying with normalized distance

的误码率,所以研究多孤子间的相互作用及其抑制方法一直是人们关注的问题^[11-13]. 为方便起见,下面以三个同相位(初相位都为零)的光孤子演化为例,它们的归一化振幅可以表示为:

$$u(0, \tau) = R_1 \times \sec h(R_1 \times (\tau - 2\tau_0)) + R_2 \times \sec h(R_2 \times \tau) + R_3 \times \sec h(R_3 \times (\tau + 2\tau_0)) \quad (6)$$

式中 $R_i (i=1,2,3)$ 为每个光孤子的振幅. 在式(6)中分别取 $R_i=1.0$, 先取 $\tau_0=5$ 代入式(4), 经过数值模拟三孤子在光纤中的传输演化如图3. 可以看出, 孤子脉冲半间距 $\tau_0=5$ 时, 孤子间的相互作用基本上可以忽略, 在相邻 100 km 之间能够稳定地传输信息. 若孤子脉冲的半宽度 $T_0=5$ ps 时, 孤子脉冲间距 $T_B=2\tau_0 T_0=50$ ps, 则单信道传输信息的比特率 $B=1/T_B \approx 20$ Gbit/s.

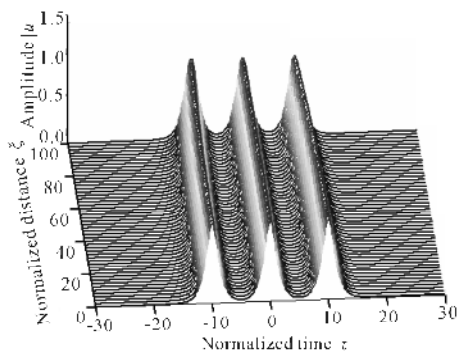


图3 脉冲半间距 $\tau_0=5$ 时三孤子的传输演化
Fig. 3 Three-soliton evolution in the fiber with initial half-separation $\tau_0=5$

为了提高信息传输的比特率,可以减小孤子脉冲的宽度,这将减小光纤的色散长度. 例如,对于色散 $\beta_2 \approx -23$ ps²/km 的光纤,当孤子脉冲的半宽度减小到 1 ps 时,色散长度将不到 50 m,当光纤长度比色散长度大得多时,色散就变得很重要,这对孤子的传输是不利的. 如果减小注入孤子的初始半间距,使 $\tau_0=3.5$ 个色散长度,则单信道传输信息的比特率 $B=1/T_B \approx 28$ Gbit/s. 这将使得孤子间的相互作

用变大,图4是取光孤子初始半间距 $\tau_0=3.5$ 的情况下,三孤子在光纤中的传输演化过程. 可见孤子间由于相互吸引或排斥形成的时间抖动使得光脉冲信号可能不在自己的比特槽内,从而引起误码,这是应当加以避免的,孤子间相互作用可以通过色散管理和不等振幅注入等方法加以抑制.

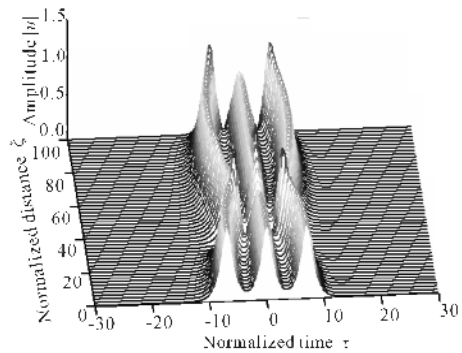


图4 脉冲半间距 $\tau_0=3.5$ 时三孤子的传输演化
Fig. 4 Three-soliton evolution in the fiber with initial half-separation $\tau_0=3.5$

2.2.1 色散管理技术

如果对光纤进行色散配置,在式(6)中分别取 $R_1=R_2=R_3=1.0$, $\tau_0=3.5$ 代入式(4)进行数值模拟,孤子的传输演化情况如图5(a)~(c). 图5(a)是色散系数 $d(\xi)=0$ 的情况,可以看出,三孤子在光纤中平稳地传输,而且相邻孤子之间没有相互作用,这是大容量、多信道孤子传输系统的理想情况. 由此看来工作在零色散波长处是很有必要的,但还必须考虑其它因素的影响. 例如在波分复用系统中,在光纤零色散波长处最多安排一个信道;另外,当GVD相当小时会发生很强的四波混频现象,它迫使波分复用系统工作在远离光纤零色散区. 色散管理技术为这一难题提供了解决方法,它由具有不同特性的光纤组合而成,使得整个光纤链路的平均色散相当低,而每段光纤的GVD足够大,以至于四波混频效应可以忽略.

图5(b)是当光纤不同段的色散系数 $d(\xi)$ 符号交替变化时孤子的传输演化情况,色散管理周期为 0.2 个色散长度(每段光纤长度为 109 m),虽然孤子没有发生时间抖动的相互作用现象,但是它的振幅波动较为严重,这种情况对信息传输不是很理想. 图5(c)是光纤色散管理周期为 0.02 个色散长度(每段光纤长度为 10.9 m)时孤子的演化情况,可见孤子的传输特性得到了改善,在光纤长度内孤子的振幅基本保持不变,它们之间的相互作用可以忽略,比较接近色散系数 $d(\xi)=0$ 的理想状况. 因此在对常规光纤进行色散补偿时,只有采取密集色散管理(放大周期远远大于色散补偿周期),才能实现光孤子脉

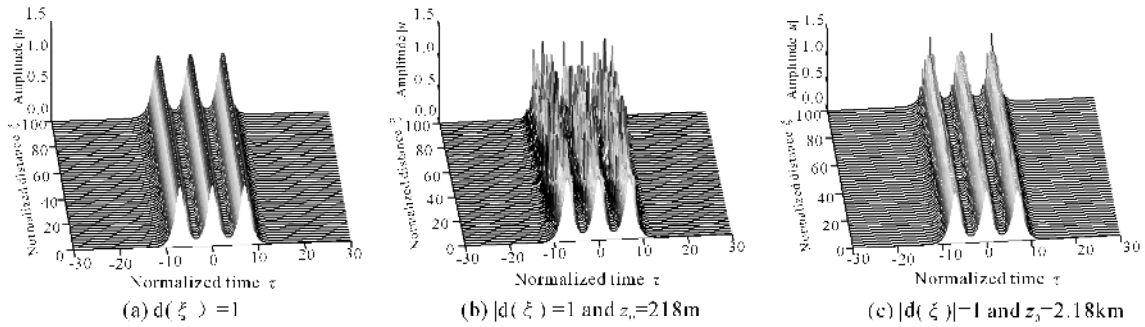


图5 色散系数 $d(\xi)$ 取不同管理周期时三孤子的传输演化
 Fig. 5 Three-soliton evolution in the fiber with dispersion coefficient $d(\xi)$ managed different period Z_0

冲的稳定传输,并且脉冲宽度越小,色散补偿周期就越小.另一方面,由于色散补偿周期太短,这给光纤的制作工艺提出了很高的要求.根据有关报道,现代的光纤制造技术已经能够很轻易地生产密集色散管理光纤(Dense Dispersion—managed Fiber,DDMF)^[14],而无需通过正负色散光纤的不断熔接来获得色散管理光纤线路.在光纤的拉制过程中,通过采用特殊技术直接生产出正负交替的色散管理光纤不仅可将色散匹配周期短至一公里以内,而且还能同时实现高阶色散补偿^[15].因此,如果没有特殊的光纤制造工艺,利用色散管理技术来抑制孤子脉冲之间的相互作用不是一个好的选择.

2.2.2 相邻孤子不等振幅法

目前认为相邻孤子不等振幅法对于孤子间的相互作用进行抑制是比较可行的方法,即在输入端让相邻孤子的振幅有所偏差,对孤子间的相互作用可起到一定的抑制效果.图6是在式(6)取 $\tau_0 = 3.5$,振幅比 $R_1 : R_2 : R_3 = 1.15 : 1.0 : 1.15$ 时三孤子的演化情况.可以清楚地看出,通过不等幅注入法有效地抑制了孤子间的相互作用,使得它们的传输特性得到了很大程度的改善.相对于色散管理方法,初始不等振幅注入法对孤子间相互作用的抑制是一个好的方法.

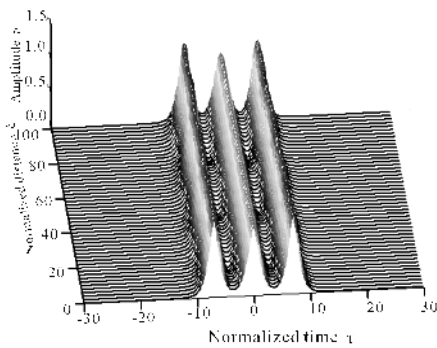


图6 不等振幅同相三孤子的传输演化
 Fig. 6 Three-soliton evolution with unequal amplitude transmission

3 结论

本文首先从描述光纤中孤子传输的非线性薛定谔方程出发,利用对称分步傅里叶变换法对方程进行求解分析,进而研究了色散管理孤子在光纤通信系统中的传输演化特性,对色散管理孤子在实际通信系统中的适用性进行了讨论.结果表明,在对常规光纤通信系统进行色散补偿时,只有采取密集色散管理(放大周期远远大于色散补偿周期),光孤子的传输特性才会有所改善,从而实现孤子脉冲的稳定传输,并且脉冲宽度越小,色散补偿周期就越小.由于色散补偿周期太短,这给光纤的制作工艺提出了很高的要求.因此,相对于初始孤子不等振幅注入法,在常规光纤中利用色散管理技术来抑制孤子脉冲之间的相互作用不一定是一个好的选择.要利用色散管理来对孤子脉冲之间的相互作用加以抑制,必须具有特殊的光纤制造工艺.

参考文献

[1] TAYLOR J R. Optical soliton-theory and experiment [M]. London: Cambridge University Press, 1992.
 [2] KNOX F M, FORYSIAK W, DORAN N J. 10Gbit/s soliton communication systems over standard fiber at 1.5 μm and the use of dispersion compensation[J]. *Journal of Light Wave Tech*, 1995, **13**(10):1955-1962.
 [3] LIANG A H. Transmission characteristics related to laplacian mode-field half-width of noncircular single-mode waveguides [J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(16): 3793-3801.
 [4] SMITHT N J, KNOX F M, DORAN N J, *et al.* Enhanced power solitons in optical fibers with periodic dispersion management[J]. *Electron Lett*, 1996, **32**(1): 54-58.
 [5] HASEGAWA A, KUMAR S, KODAMA Y. Reduction of collision induced time jitters in dispersion managed soliton transmission system [J]. *Optics Lett*, 1996, **21**(1): 39-41.
 [6] ZHANG Xiang-Yang, WANG Xiang-Zhao. Study on dispersion-managed soliton in birefringent optical fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 1043-1047.
 张向阳,王向朝. 双折射光纤中色散管理孤子研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(7): 1043-1047.

- [7] ZHANG Xiao-Guang, LIN Ning, ZHANG Tao, *et al.* 10GHz, 38km prechirped dispersion-managed soliton transmission [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(7):813-817.
张晓光, 林宁, 张涛, 等. 预啾啾 10GHz, 38km 色散管理孤子的传输实验[J]. 光子学报, 2001, **30**(7):813-817.
- [8] ZHANG Fan, YE Pei-da. Timing jitter in dispersion-managed soliton systems controlled in time and frequency domain [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2):133-136.
- [9] ZHANG Fan, WU Jian, ZHANG Min, *et al.* Evolution of strong dispersion managed soliton in dense period fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(5):561-565.
- [10] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002:33-34.
- [11] MARCUSE D, WIESENSELD J M. Chirped picosecond pulses evaluation of the time-dependend wavelength for semiconductor film lasers[J]. *Appl Opt*, 1984, **23**(1):74-81.
- [12] WANG Zhong-Qing, LI Jun-hong, AN Guang-lei. Influences of Kerr coefficient distributing randomly on the interaction of optical solitons[J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(6):55-57.
汪仲清, 李俊红, 安广雷. Kerr 系数随机扰动下孤子间相互作用的研究[J]. 激光杂志, 2005, **26**(6):55-57.
- [13] LI Jun-hong, Wang Zhong-qing. Numerical research of initial chirp effect on solitons propagation properties [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(3):193-195.
李俊红, 汪仲清. 初始啾啾对孤子传输特性影响的数值研究[J]. 激光与红外, 2006, **36**(3):193-195
- [14] ANIS H, BERKEY G, BORDOGNA G, *et al.* Continuous dispersion managed fiber for very high speed soliton systems [C]. Eur Conf Optical Communication, New York: IEEE, 1999, **1**:30.
- [15] GUO Shu-qin, ZHOU Guo-sheng. The characters of sub-picosecond optical pulse transmitting in dense dispersion - managed optical fiber [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2002, **8**(2):81-84.
郭淑琴, 周国生. 亚皮秒光脉冲在密集色散管理光纤中的传输特性[J]. 量子光学学报, 2002, **8**(2):81-84.

Investigation on the Communications Feasibility of Picoseconds Soliton Transmitted in Dispersion Management Fibers

WAGN Zhong-qing, WAN Peng, LAI Chang

(College of Optical and Electronic Engineering, Chongqing University of Post and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Received date: 2007-03-01

Abstract: Starting from the nonlinear Schrödinger (NLS) equation expressing the soliton pulse transmitted in optical fibers, the evolution properties of the dispersion management soliton (DMS) are studied by making use of symmetrical slit-step Fourier numerical method, which the communications feasibility of DMS is analyzed. It is shown that the interaction of the optical solitons is decreased when the solitons are transmitting in the fiber dense managed opposite dispersion coefficient periodically, which the transmission properties of the soliton are improved. And then, that there must be a special manufacture technology of fiber is pointed out in this paper if the method of DMS is used to inhibit the interaction of the solitons in normal fiber, which will increase the bit rate of the information transmission.

Key words: Dispersion management soliton; Transmission property; Nonlinear Schrödinger equation; Slit-step Fourier numerical method; Optical soliton communications



WANG Zhong-qing was born on August 30, 1956, in Sichuan Province, China. He graduated from Southwestern Normal College in 1982. Now he is a professor of Chongqing University of Post and Telecommunications. His present research interests are in quantum optics, nonlinear optics and optical communications, etc.