



光纤损耗对孤子系统传输的影响

徐丹 萨茹拉

(内蒙古师范大学物理与电子信息学院 内蒙古 呼和浩特 010021)

(收稿日期:2015-02-04)

摘要:利用分步傅立叶法数值求解了包含光纤损耗效应的非线性薛定谔方程,分别仿真模拟了其对亮孤子和暗孤子脉冲在各向同性光纤中传输特性的影响.结果表明,随着传输距离的增大,光纤损耗导致基阶亮孤子和暗孤子的峰值功率减小,脉冲加速展宽.而对于高阶孤子,光纤损耗会破坏高阶亮孤子的周期性变化,但对于高阶暗孤子的影响几乎与基阶暗孤子相同.因此在光纤损耗参数相同的情况下,暗孤子的相对衰减率比亮孤子的相对衰减率小,故暗孤子比亮孤子更稳定.

关键词:光纤损耗 光孤子 相对衰减率

1 引言

光脉冲在光纤中传输时,若群速度色散效应(GVD)与自相位调制效应(SPM)平衡,即可形成光孤子.光孤子可以在光纤中实现无畸变传输,这对光纤通信有重要意义^[1~3].光纤损耗是光纤的传输特性之一^[4,5],在孤子通信系统中可以不用中继站,而正是由于光纤损耗的存在,必须对光纤损耗进行增益补偿^[6],才可把光信号无畸变地传输极远距离.有关损耗对孤子通信系统的相关研究,从20世纪70年代起有所关注^[7~9],最近相关作者^[10]研究了内部具有分段纤芯和凹陷包层结构的超低损耗光纤(ULL),其损耗在1.55 μm处可降低至0.18 dB/km,这接近光纤损耗的理论极限.关于光孤子的传输特性绝大多数是在忽略光纤损耗的情况下进行的,近些年,Kurokawa研究了色散管理孤子在超低损耗光纤中的传输特性^[11],而有关于光纤损耗对孤子(亮孤子和暗孤子)系统传输特性的文章较少.

本文利用分布傅立叶法^[12]数值求解了考虑光纤损耗效应后,光孤子在各向同性介质中传输时所满足的非线性薛定谔方程,分别仿真模拟了光纤损耗对亮孤子和暗孤子传输特性的影响.结果表明,在光纤损耗参数相同的情况下,暗孤子比亮孤子更稳

定.

2 理论模型

在考虑光纤损耗的情况下,光孤子在各向同性介质中传输时,其慢变包络振幅 A 所满足的非线性薛定谔方程为^[12~17]

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

其中, α 为损耗参数, β_2 为二阶色散系数, $T = t - \frac{z}{v_g}$ 是脉冲以群速度的移动参考系中的时间尺度, γ 为非线性系数,方程(1)右边3项分别描述了光脉冲在光纤中传输时的光纤损耗、色散效应和非线性效应.

采用分布傅立叶法对式(1)进行数值求解,现将式(1)改写为如下形式

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

上式中 \hat{D} 是微分算符,表示线性介质的色散和吸收, \hat{N} 是非线性算符,表示光脉冲在介质中传输时所受到的非线性效应的影响.这两个算符分别为

$$\hat{D} = -\frac{i\beta_2}{2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial T^2} - \frac{\alpha}{2} \quad (3)$$

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

作者简介:徐丹(1989-),女,在读研究生,主要从事信息技术和物理教学方面的学习和研究.

指导教师:萨茹拉(1974-),女,副教授,主要从事理论物理的教学及研究.

光脉冲在光纤中传输时,色散作用和非线性作用是同时存在的,为了简化问题,分布傅里叶法中假设光脉冲在光纤中传输时,光场在一小段长度 h 内受到色散作用和非线性作用是独立的,进而得出一个近似结果,因为 h 非常小,所以在误差要求的范围内,这个结果可以认为是较为精确的结果^[17]. 其具体过程为:光脉冲在 z 到 $z+h$ 这一小段距离内传输时,分两步走. 下面对式(3)和式(4)分别进行求解,得出线性算符和非线性算符. 利用 MATLAB 软件计算线性算符和非线性算符以及脉冲传输过程中的具体数值,并进行曲线仿真.

3 数值模拟讨论与分析

现输入亮孤子和暗孤子脉冲,其表达式分别为

$$A_1(0, T) = N \operatorname{sech}(T) \quad (5)$$

$$A_2(0, T) = N \tanh(T) \quad (6)$$

其中, N 为孤子阶数,当 $N=1$ 时为基阶孤子,当 $N=2$ 时为二阶孤子,当 $N=3$ 时为三阶孤子,二阶以上孤子统称为高阶孤子. 本文中孤子初始输入脉宽均为 $T_0 = 1$ ps, 波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 输入功率 $P_0 = 1$ kW, 孤子周期 $z_0 = \frac{\pi}{2} \frac{T_0^2}{|\beta_2|}$ ^[12]. 选取石英单模光纤, 其在 $1.55 \mu\text{m}$ 处的损耗参数 $\alpha = 0.18$ dB/km, 非线性系数 $\gamma = 1 \text{ w}^{-1}/\text{km}$. 其使亮孤子在反常色散区 ($\beta_2 = -1 \text{ ps}^2/\text{km}$) 传输, 暗孤子在正常色散区 ($\beta_2 = 1 \text{ ps}^2/\text{km}$) 传输, 利用 MATLAB 软件分别模拟其演化过程.

3.1 基阶孤子 ($N=1$)

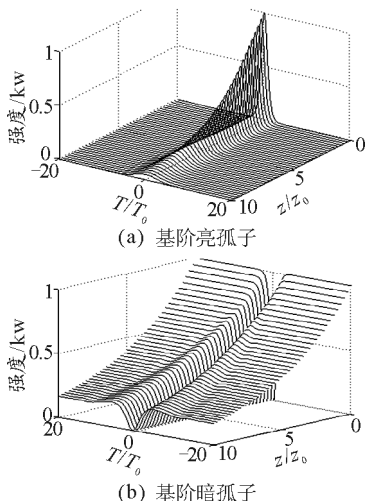


图1 考虑损耗的情况下,基阶孤子脉冲在 10 个孤子周期内的演化

在不考虑光纤损耗 ($\alpha = 0$) 的情况下,基阶亮孤子和基阶暗孤子在传输过程中脉冲形状均保持不变,正是基于这一特性,使其在光通信系统中具有较大吸引力. 而考虑光纤损耗后,由于损耗的影响,孤子的传输波形随传输距离的增大,脉冲的峰值加速衰减,最终会逐渐消失. 如图 1, 它给出了 $\alpha = 0.18$ dB/km 和 $N=1$ 时,基阶孤子在光纤中随传输距离的演化过程. 其中(a)为基阶亮孤子;(b)为基阶暗孤子. 从图中可以看出,随着传输距离的增大,脉冲的峰值功率加速减小,脉冲宽度不断增大,而在相同传输距离处,亮孤子的衰减速度要大于暗孤子的衰减速度,而暗孤子在传输过程中脉宽展宽速度比亮孤子慢. 如图 2 所示,它给出了 $\alpha = 0.18$ dB/km 和 $N=1$ 时,基阶孤子在 $\frac{z}{z_0}$ 为 10 的脉冲波形,其中实线表示初始基阶孤子,虚线表示光孤子传输到 $10 z_0$ 时的脉冲形状,(a)为亮孤子脉冲;(b)为暗孤子脉冲. 从图 2 可以更加清晰地看出光纤损耗对亮、暗孤子影响的强弱程度,不妨引入相对衰减率

$$d = \frac{P_0 - P_1}{P_0} \times 100\%$$

其中, P_0 为初始脉冲的峰值功率, P_1 为传输到一定距离处的峰值功率. 由图 2(a) 可以计算出亮孤子传输的 $10z_0$ 处的衰减率 $d_{\text{亮}} \approx 95\%$, 而暗孤子传输到 $10z_0$ 处的衰减率为 $d_{\text{暗}} \approx 83.5\%$. 可以看出,基阶暗孤子和基阶亮孤子,当光纤中损耗参数相同时,基阶暗孤子比基阶亮孤子更稳定,其脉冲展宽速度更慢.

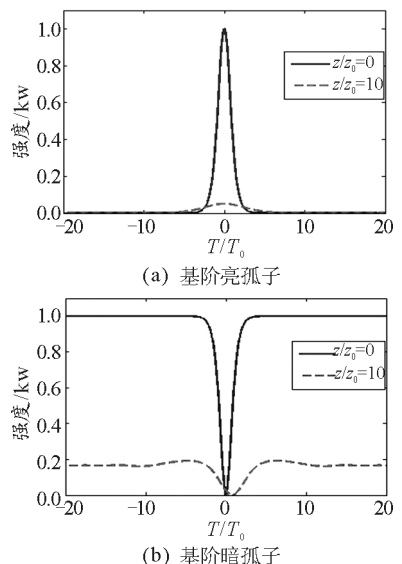
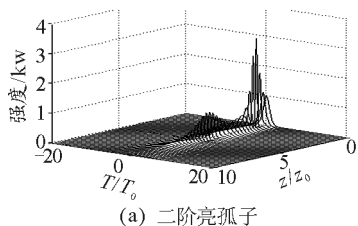


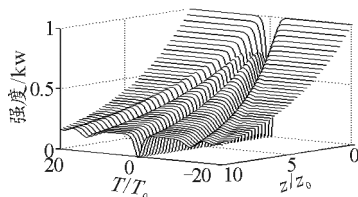
图2 基阶孤子的初始脉冲以及基阶孤子传输到 10 个孤子周期时的脉冲形状

3.2 二阶孤子 ($N=2$)

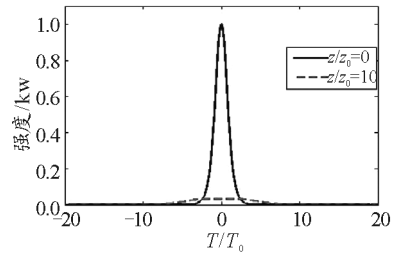
在不考虑光纤损耗的情况下,基阶孤子的 GVD 和 SPM 相互平衡,这样脉冲的形状和频谱都不发生变化.对于二阶亮孤子,在光纤中传输时,其脉冲形状遵循一种周期性^[12],即脉冲形状在 $z = mz_0$ (m 为整数) 处得到恢复.而二阶暗孤子在光纤中传输时,其在中央黑孤子两侧出现了一对灰孤子,由于群速度不同,灰孤子随着传输距离的增大而逐渐远离中央黑孤子.而考虑损耗后,如图 3 所示,它给出了损耗参数 $\alpha = 0.18$ dB/km 时二阶孤子在 5 个孤子周期内的演化过程,其中(a)、(c) 为亮孤子; (b)、(d) 为暗孤子.从图 3(a)、(b) 中可以看出,二阶亮孤子不再具有周期性,脉冲经历一个初始窄化的过程,导致其峰值加速增大到 z_0 处达到最大值,而后加速衰减,传输到 $2z_0$ 处降为最小,随后脉冲又变窄故峰值功率又再次增大,传输到 $4z_0$ 处脉冲峰值再次达到最大值,而后不再出现周期性的变化,随传输距离增大而逐渐衰减,最终消失.而暗孤子的峰值功率随着传输距离的增大加速减小.图 3(c) 和(d) 分别是亮孤子和暗孤子在的初始位置(实线)和传输到 $10z_0$ 处(虚线)的脉冲形状.可以看出在 $10z_0$ 处亮孤子的脉冲展宽程度要远大于中央黑孤子的展宽程度.利用之前引入的相对衰减率 d ,可以分别计算出亮孤子和暗孤子的相对衰减率为: $d_{\text{亮}} \approx 96.85\%$, $d_{\text{暗}} \approx 82.17\%$.从中可以看出,二阶亮孤子的相对衰减率略有增大,而二阶暗孤子的相对衰减率几乎不变.因此光纤损耗破坏了亮孤子的周期性变化,而当光纤中损耗相同时,暗孤子的衰减速度要小于亮孤子的衰减速度,其展宽程度也比亮孤子的展宽程度小,故相比之下暗孤子比亮孤子更稳定.



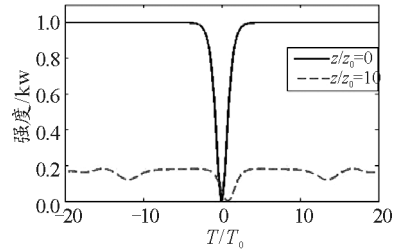
(a) 二阶亮孤子



(b) 二阶暗孤子



(c) 二阶亮孤子



(d) 二阶暗孤子

图 3 在损耗情况下二阶孤子在 10 个孤子周期内的演化过程

3.3 三阶孤子 ($N=3$)

由上述分析可知,在忽略光纤损耗的情况下,二阶亮、暗孤子均表现为不同于基阶孤子的传输特性,对于三阶 ($N=3$) 或更高阶孤子也表现出类似的特性,尤其是三阶亮孤子脉冲形状遵循一种周期性,即脉冲形状在 $z = mz_0$ (m 为整数) 处得到恢复,且在半周期 $z = \frac{1}{2}mz_0$ 处主峰两边各有两个明显的小峰.而对于三阶暗孤子,在中央黑孤子的两侧出现了两对灰孤子.可以这样理解,对于 N 阶 ($N \geq 3$) 亮孤子,一开始 SPM 起到主要作用,但是 GVD 很快就起作用,并且导致脉冲窄化,正是 GVD 和 SPM 两种效应的共同作用使脉冲发生周期性的演化.而对于 N 阶暗孤子,输入脉冲的宽度减小为 N 倍,就会形成振幅为 $N \tanh(NT)$ 的基阶黑孤子^[12],在此过程中,输入脉冲流失一部分能量,这部分能量形成了灰孤子.由于群速度的不同,这些灰孤子逐渐离开中央黑孤子,且灰孤子的对数为 $N-1$.图 4 表示在考虑损耗情况下,三阶亮、暗孤子脉冲在 10 个孤子周期内的演化过程,其中(a)、(c) 表示三阶亮孤子; (b)、(d) 表示三阶暗孤子.从图 4(a) 可以看出三阶亮孤子脉冲首先经历一个初始窄化的过程,脉冲主峰峰值在 $0.5z_0$ 处达到最大值随后加速减小,当传输到 z_0 处主峰两侧对称性地出现两个小峰,随后传输到 $1.5z_0$ 处主峰再次达到最大值而后又加速减小,传输到 $2.5z_0$ 处又出现两个小峰,而后主峰在 $3z_0$ 处又达到最大值,最后峰值逐渐衰减,最终消失.而对于三阶暗孤子脉冲峰值一直成指数衰减,最终消失.因此

光纤损耗破坏了三阶亮孤子的周期性变化,在光纤的损耗相同时,三阶暗孤子比三阶亮孤子衰减速度小.图5给出了不同孤子脉冲在光纤衰减参数相同时相对衰减系数随传输距离的变化关系.从中可以看出损耗对于亮孤子的影响要大于暗孤子,而且在暗孤子中相对衰减系数几乎不随孤子阶数的变化而变化,从而表现为在损耗系数相同的光纤中,暗孤子比亮孤子更为稳定.

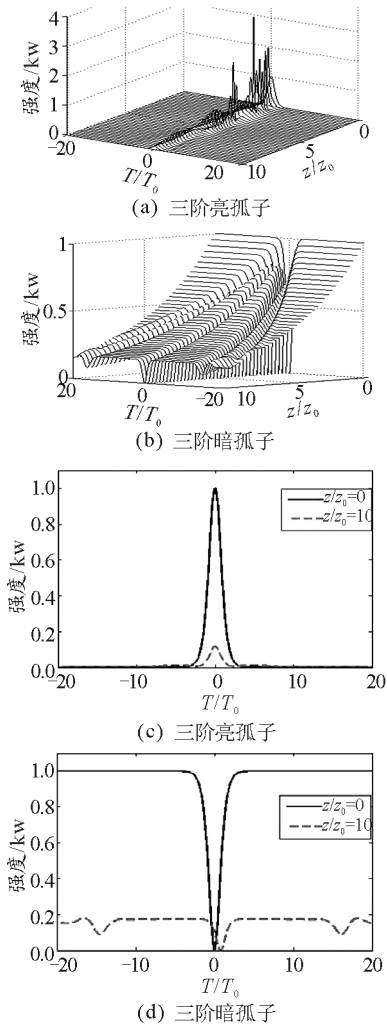


图4 在考虑损耗的情况下,三阶孤子在10个孤子周期内的演化过程

4 结论

在考虑光纤的损耗作用的情况下,运用分步傅立叶法对光孤子的慢变包络振幅 A 所满足的非线性薛定谔方程进行数值求解,并分别对不同阶数的亮孤子和暗孤子的演化情形进行讨论.结果表明,基阶亮孤子和暗孤子在传输过程中,光纤损耗会导致其峰值功率减小,脉冲加速展宽,而暗孤子的相对衰减

率要比亮孤子的相对衰减率小.对于高阶亮孤子和暗孤子,损耗破坏了三阶亮孤子的周期性变化;而损耗对于高阶暗孤子的影响几乎与基阶暗孤子相同.从而表现为在光纤中有损耗以及背景噪声的情况下,暗孤子比亮孤子更为稳定.

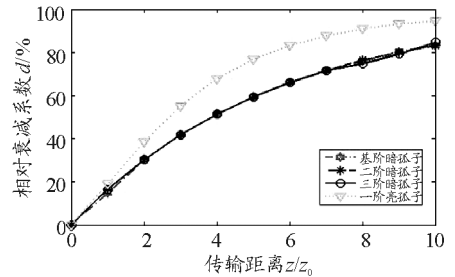


图5 不同孤子脉冲的相对衰减率随传输距离的变化关系

参考文献

- 1 Kompfner R 1965 Science 8 149 ~ 155
- 2 Tsigaridas G, Polyzos I, Giannetas V, Persephonis P 2008 Chaos, Solitons & Fractals 35 151 ~ 160
- 3 Kibeler B, Fatome J, Finot C, Millot G, Dias F, Genty G, Akhmediev N, Dudley J M 2010 Nat. Phys. 6 790 ~ 795
- 4 Mollenauer L F 2003 Science 7 996 ~ 997
- 5 Smith C M, Venkataraman N, Gallagher M T, West J A, Borrelli N F, Allan D C, Koch K W 2003 Nature 424 657 ~ 659
- 6 Dung J C 2005 Opt. Commun. 246 85 ~ 89
- 7 Kapron F P, Kerk D B, and Maurer R D 1970 Appl. Phys. Lett. 17 423 ~ 425
- 8 Horiguchi M and Osanai H 1976 Electron. Lett., 12 310 ~ 312
- 9 Miya T, Terunuma Y, Hosaka T, and Miyashita T 1979 Electron. Lett. 15 106 ~ 108
- 10 Pournoury M, Moon D S, Nazari T, Kassani S H, Do M H 2014 Opt. Commun. 317 13 ~ 17
- 11 Kurokawa K, Tajima K, Tsujikawa K, Nakajima K 2006 J. Lightwave Technol. 24 32 ~ 37
- 12 Agrawal G P 2013 Nonlinear Fiber Optics (5nd ed.) (Boston: Academic Press)
- 13 Yu Yu, Jia Wei-Guo, Yan Qing et al. Acta Phys. Sin., 2015, 64(5):054207 (in Chinese)
- 14 Wang Mei-Jie, Jia WeiGuo, Zhang Si-Yuan et al. Acta Phys. Sin., 2015, 64(3):034212 (in Chinese)
- 15 Potasek M J 1987 Opt. Lett. 12, 921
- 16 Zhong X Q, Tang T T, Xiang A P 2011 Opt. Commun. 284 4727
- 17 Hook A, Karlsson M, 1993 Opt. Lett. 18, 1388