

单模光纤中光脉冲对的聚合与分裂*

苗润才 曾祥梅 王飞

(陕西师范大学物理学与信息技术学院, 西安 710062)

摘要 对于双光脉冲在非线性单模光纤中传输问题,通过数值求解非线性 Schrödinger 方程,发现脉冲的分裂、聚合现象. 讨论了不同入射光强度下,分裂、聚合的特点,以及产生分裂、聚合的物理机制. 对聚合后光脉冲的频谱进行了分析,除了观察到与入射脉冲相同的中心频带外,还存在两个频带较宽的边带.

关键词 光脉冲; 传输; 聚合和分裂

中图分类号 O437 **文献标识码** A

0 引言

对单脉冲孤子理论的研究^[1],已相对较为完善. 然而,在实际应用中,采用多脉冲串. 一般情况下,根据 Gordon-Haus 效应可知:由于光脉冲之间的相互作用,限制传输的信息量^[2,3]. 因此,脉冲间的相互作用是光纤传输中的一个非常重要的问题. 迄今为止,大多数的研究都局限在基孤子的相互作用^[4~6],也就是说,大多数研究是针对入射光强度较小、相互作用较弱的条件. 而本文将考虑入射强度较大,相互作用较强的条件下双脉冲光的传输问题. 对于所研究的双脉冲,假定双脉冲的强度相同,位相相等,时间间隔较小,同时考虑自相位调制(SPM)和群速度弥散(GVD)效应,采用数值求解非线性 Schrödinger 方程的方法,观察双脉冲在传输过程中脉冲的变化特点,发现了光脉冲在传输过程中的聚合、分裂现象. 从非线性光学的角度出发,研究光束分裂和聚合的特点、与入射光强度的关系,获得双脉冲相互作用的传输规律以及产生上述现象的物理机理.

1 基本方程

假定光纤中电场分量的形式为 $E = A(z, t) \cdot \exp(-i\omega_0 t)$, 在慢变化包络近似条件下,光纤中光束的传播可以用非线性 Schrödinger 方程来描述^[2], 即

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

$A(z, T)$ 为光脉冲的振幅. 式中第二项为损耗项, α 为光纤损耗系数, 第三项为色散项, β_2 为群速度色散(GVD)系数, 第四项为自相位调制(SPM)项, γ 为

非线性参量. 非线性参量 γ 与非线性折射率系数 n_2 的关系为 $\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{\text{eff}}}$, 其中 A_{eff} 为光纤的有效芯径面积, ω_0 为脉冲中心频率, c 是光速. $T = t - z/v_g$, v_g 为群速度, 参量 $N^2 = \frac{T_0^2 \gamma P_0}{|\beta_2|}$, P_0 为初始输入光脉冲峰值功率, T_0 为入射脉冲的脉宽.

根据方程(1)可知:假定 E 沿 z 方向变化, 介质是瞬时响应的, 无吸收, 即 $\alpha = 0$, 仅考虑二阶的色散效应和自相位调制效应, 且忽略高阶色散效应和高阶非线性效应. 又假定入射脉冲为双曲正割形, 则入射初始脉冲为

$$A(0, T) = \sqrt{P_0} (\text{sech}(T/T_0 - q_0) + r \text{sech}(T/T_0 + q_0)) \exp(-i\theta) \quad (2)$$

式中 θ 为相对位相, $2q_0 T_0$ 为初始光脉冲的时间间隔, r 为相对振幅. 本文仅考虑脉冲对的位相相同、振幅相等, 即 $r = 1, \theta = 0$. 对式(1)在式(2)的初始条件下进行数值计算, 且取入射光束的波长均为 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $T_0 = 5 \times 10^{-2} \text{s}$. 在普通光纤中 $n_2 = 2.4 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$, $A_{\text{eff}} = 40 \mu\text{m}^2$, $\beta_2 = -25.5 \text{ps}^2/\text{km}$, 分别计算各种不同输入光强度下双脉冲在光纤中的传输情况.

2 结果及机理分析

从双脉冲的三维传输图像看, 脉冲在介质中传输时发生脉冲的聚合与分裂现象, 并且对于不同的入射光功率, 分裂与聚合的特点不同. 图1为入射光脉冲强度为 1700 mW, $N = 1.42$ 时, 双脉冲在光纤中传输的三维图像. 由图可以看出, 入射的两个光脉冲, 在传输的初始阶段, 这两个脉冲都经历一个压缩阶段, 压缩的结果是两脉冲的脉宽变窄, 峰值变强, 一直到脉宽最窄, 峰值最大. 再随着传输距离的增大, 这两个脉冲又要展宽. 由于这两个脉冲的展宽, 脉冲的边沿部分叠加. 叠加的结果是原来的脉

*国家教育部骨干教师基金(批准号:200065)资助项目
Email:rcmiao@snnu.edu.cn
收稿日期:2003-08-12

冲逐渐减小,在两脉冲之间形成一个新的峰,且随着传输距离的增加,这个新峰逐渐压缩.当传输距离为 2.6 km 时,原来的两个脉冲的强度达到极小值,而这个新峰的强度达到极大值,其值为 11566 mW.再随着传输距离的增大,这个新峰将表现为周期性的分裂和聚合.

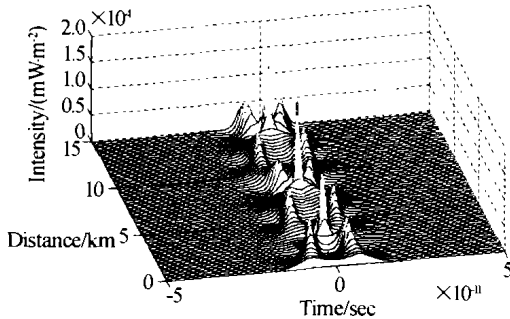


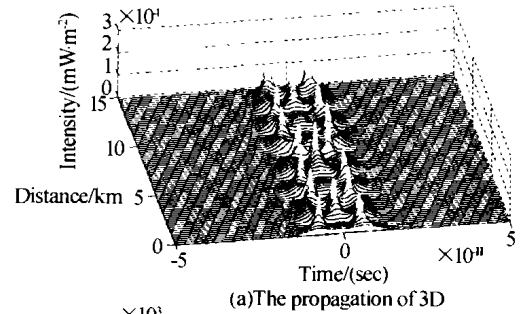
图 1 双光脉冲在光纤中的传输 $N = 1.42$

Fig. 1 Evolution of a pulse pair in optical fiber when $N = 1.42$

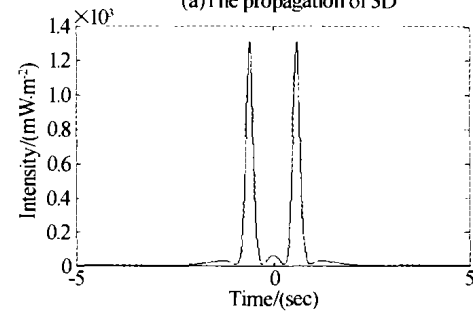
在我们所考虑的因素当中,当光脉冲在介质中传输时,脉冲要同时受到GVD和SPM的共同作用.GVD效应使脉冲展宽,SPM效应使脉冲压缩.对于图 1 所示的两个人射脉冲,由于脉冲的 $N > 1$, SPM起主导作用,因而,在脉冲传输的初始阶段,这两个人射脉冲要被压缩.当这两个脉冲被压缩至脉宽最窄时,GVD起主导作用,所以这个阶段脉冲又会展宽.展宽后的两脉冲相互叠加.对于位相相同、强度相等的两个脉冲,如果时间间隔较小,前一个脉冲的下降沿和后一个脉冲的上升沿将发生重叠,这样重叠的部分会发生交叉相位调制,交叉相位调制使得前一个脉冲的频率减小,后一个脉冲的频率增大,两脉冲逐渐靠近,最后聚合成一个脉冲.从物理的角度看:展宽后的两脉冲相互叠加,由于两脉冲位相相同,叠加处干涉相长.相长干涉的结果是,在中间部分形成一个峰.由于所形成的峰 $N > 1$,此时,SPM起主导作用,因而,这个峰逐渐压缩,最后达到最大值.这个峰由两组不同频带的成分构成,由于频率不同,其传播速度不同,因此随着传输距离的增加,这个峰又分裂为两个峰.且这两个峰在传输的过程中相对位相不断的发生变化,因而传输规律表现为周期性的分裂、聚合.

图 2(a)为双脉冲在光纤中传输的三维图像,其中入射光脉冲强度为 2500 mW, $N = 1.73$.由图 2(a)可以看出,入射的两个光脉冲,在传输的初始阶段与图 1 相同.这两个脉冲都要经历一个压缩阶段,在传输距离为 1.0 km 时,脉宽最窄,峰值最大,该位置处的波形图如图 2(b)所示.由于入射的光强度比图 1 中的入射强度大,因此脉冲压缩速度快,压缩距离短,并且中间部分要隆起,图 2(b)中中间位置的小峰就表示这个隆起部分.再随着传输距离

的增大,这两个脉冲又要展宽.在两脉冲之间形成一个新的峰,且随着传输距离的增加这个新峰逐渐压缩.当传输距离为 2.8 km 时,这个新峰的强度达到极大值,其峰值为 14691 mW.但与图 1 不同的是,原来的那两个峰并不是极小值,仍然有两个小峰存在.同样这种分裂、聚合周期性变化.



(a)The propagation of 3D



(b)Pulse shape at $Z = 10$ km

图 2 双光脉冲在光纤中的传输波形图 $N = 1.73$

Fig. 2 Evolution of a pulse pair in optical fiber when $N = 1.73$

图 2 中中间位置隆起小峰的原因在于:随着入射光脉冲强度的增大,介质的 SPM 效应增强.因此,在传输的初始阶段,脉冲的压缩程度比图 1 中的压缩程度大.对于每一个脉冲,由于 SPM 所引起的频率啁啾在远离脉冲中心位置处具有非线性特点,因此在脉冲压缩的过程中,远离中心的两侧各有一个小伴峰.这样的结果是,两脉冲内侧的两个小伴峰在时间上重叠,从而中间部分要隆起.

当继续增大入射光脉冲强度,虽然仍有分裂、聚合的现象,但该现象的特点有所不同.图 3(a)中 $N = 2$.在传输的初始阶段,与图 2(a)相同,脉冲也要经历一个压缩、展宽、聚合、分裂的周期性过程.与图 2 不同的是,中间聚合的新峰的强度极大值不同,且脉宽压缩的距离也不同.当传输距离为 2.8 km 时聚合的峰达最大值,其值为 39131 mW.在这个最大峰值之后,时域上存在三个脉冲串,且随着传输距离的增加,这三个脉冲在时域上逐渐分开.沿着图 3(a) $T = 0$ 处做一个脉冲强度随距离变化的二维图,即图 3(b).由图 3(b)可以看出,在聚合的最大峰之后,脉冲的强度随着距离呈现周期性的变化.当传输距离为 2.8 km 时,聚合效应在中心形成一个最大峰,我们对该距离处的波形图进行了傅里叶变换,得到了相应频谱图,结果如图 3(c)所示.频谱图

中,中间有一个频带,中心频率与入射光脉冲的中心频率相同. 该频带宽度较窄,信号强度较强. 除这

个中心频带以外,还存在两个边带,边带的宽度较宽,信号相对较弱.

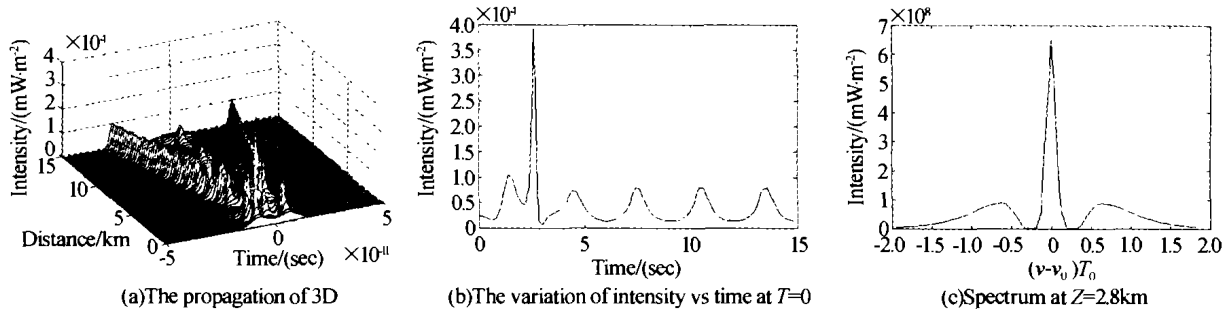


图 3 双光脉冲在光纤中的传输图 $N=2$

Fig. 3 Evolution of a pulse pair in optical fiber when $N=2$

图 2(a) 中两个人射脉冲在介质中传输时,随着传输距离的增加,对应的脉冲间隔表现为周期性的变化. 而图 3(a) 中两个人射脉冲在介质传输一段距离后,对应的脉冲间隔随着传输距离的增加而增加. 出现这种现象的原因可能是:两个脉冲在传输过程中,受自相位调制的作用,分裂后的两个脉冲之间位相差发生了变化,使得这两个脉冲之间产生一种“排斥力”. 在这种“排斥力”的作用下,两脉冲间隔随传输距离而增大.

仍然有两个小峰存在. 当入射光脉冲强度更大时,脉冲也要经历一个压缩、展宽、聚合、分裂的周期性过程. 但聚合的脉冲有一个最大,且随着传输距离的增加,分裂的两个脉冲在时域上逐渐分开. 聚合最大的脉冲的傅里叶频谱,除一个中心频带外,还存在两个边带,边带的宽度较宽,信号相对较弱.

3 结论

对强度较大双脉冲入射光,同时考虑 SPM 和 GVD 效应,采用数值求解非线性 Schrödinger 方程的方法,讨论脉冲的变化特点. 当入射光脉冲的强度超过一定值时,脉冲在介质中传输时发生聚合与分裂现象,并且对于不同的人射光功率,分裂与聚合的特点不同. 当入射光强度相对较小时,脉冲都经历压缩、展宽、相干叠加,形成一个新的脉冲,随着传输距离的增大,这个脉冲表现为周期性的分裂和聚合. 当入射光强度继续增大时,脉冲同样经历压缩、展宽、相干叠加. 但此时压缩速度快,压缩距离短,并且中间部分要隆起. 随着传输距离的增大,同样会形成一个新的脉冲,且该脉冲周期性分裂、聚合变化. 当新的脉冲形成时,原来的那两个峰并不是极小值,

参考文献

- 1 Agrawal G P, Nonlinear fiber optics. Academic, San Diego, Calif, 1989. 105 ~ 146
- 2 Turitsyn S K, Fedoruk M P, Gornakova A, Reduced-power optical solitons in fiber lines with short-scale dispersion management. *Optics Letters*, 1999, **24**(13): 869 ~ 871
- 3 钱士雄, 王恭明. 非线性光学——原理与进展. 上海: 复旦大学出版社, 2000. 431 ~ 433
Qian S X, Wang G M. Nonlinear Optics-Principle and Development. Shanghai: Fudan University Press, 2000. 431 ~ 433
- 4 Gordon J P. Interaction forces among solitons in optical fibers. *Optical Letters*, 1983, **8**(11): 596 ~ 598
- 5 Stegeman G I. Optical spatial solitons and their interactions: universality and diversity. *Frontiers in Optics*, 1999, **286**(19): 1518 ~ 1523
- 6 Hong B J, Yang C C. Interaction between femtosecond solitons in optical fibers. *J Opt Soc Am (B)*, 1991, **8**(5): 1114 ~ 1121

Merging and Splitting of Pulses in Optical Fibers

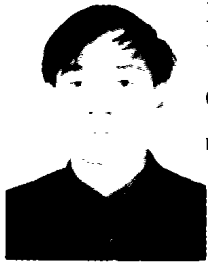
Miao Runcai, Zeng Xiangmei, Wang Fei

Department of Physics and Information, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062

Received date: 2003-08-12

Abstract It is found the merging and splitting of optical pulses by solving nonlinear Schrödinger equation numerically for the problem of transmission in nonlinear single-mode optical fibers. It is discussed the trait and the physical principle of the merging and splitting of the pulses under the different intensities and analyze the pulse spectrum when pulses merging. There is a spectral band with the same center-frequency as that of the incidence pulse and two wider sidebands.

Keywords Optical pulses; Transmission; Merging and splitting



Miao Runcai was born in 1957. He graduated from the Department of Physics Shaanxi Normal University in 1984 and obtained Master Degree. In 1997, he got his Ph. D. from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics. His research interests include transient optics and optical measurement.