

# 准孤子对间作用及对传输容量和距离的制约\*

薛文瑞<sup>1)</sup> 李学敏<sup>2)</sup> 李仲豪<sup>2)</sup> 周国生<sup>2), 3)</sup>

- 1), 山西大学物理系, 太原 030006
- 2), 山西大学电子信息技术系, 太原 030006
- 3), “区域光纤通信网与新型光通信系统”国家重点实验室, 北京大学, 北京 100871

**摘 要** 通过对光纤级联系统中一对准孤子的传输进行理论分析和数值模拟, 研究了准孤子间相互作用及其对系统传输容量和距离的制约, 并首次分析了准孤子对传输的精细过程。

**关键词** 光纤级联系统, 准孤子, 相互作用。

## 1 引 言

光纤级联系统是一种色散补偿系统, 它由色散补偿光纤(DCF)、普通单模光纤(SMF)和掺铒光纤放大器(EDFA)构成一个个的周期链。当色散效应和非线性效应、功率损耗和放大相互平衡时, Sech 型光脉冲可实现稳定传输。1990 年 Hasegawa 等提出这种光纤级联系统中可能存在中心导引孤子<sup>[1]</sup>; 1996 年 Gabitov 等指出这种系统中存在“呼吸子”(breathing soliton)<sup>[2]</sup>, 同年 Smith 等人用数值法模拟了无损光纤级联系统中光脉冲的传输, 指出有准稳孤子存在<sup>[3]</sup>。1997 年 Tang 等考虑了光纤的损耗, 也用数值法模拟了具有等长的色散补偿光纤及单模光纤构成的级联系统特性, 指出只有在每一节中色散补偿光纤-单模光纤-色散补偿光纤对称分布的情况下才有准稳孤子存在, 传输 1500 km 脉宽改变达 7%<sup>[4]</sup>。

文献[5]的理论和数值模拟表明<sup>[6]</sup>, 用中心波长为 1550 nm、初始脉宽为 50 ps、初始啁啾为  $C = 0$  的单个 sech 型光脉冲入射, 在每一节中色散补偿光纤-单模光纤-色散补偿光纤不一定要对称分布, 例如若以图 1 所示的配置设计, 在传输 10000 km 过程中, 脉宽只改变 1% 左右。这一特点, 就

为大容量、长距离光脉冲传输展现了一个乐观的前景。  
光纤通信系统的容量决定于相邻码或脉冲间的时间间隔, 而传播距离决定于相邻码或脉冲间的间隔的稳定性。码间间隔越小, 容量越大; 间隔的稳定性越好, 传播距离越远。对于光纤级联准孤子传输系统来说, 脉冲为 sech 型, 而两准孤子间会因相互作用而产生离合

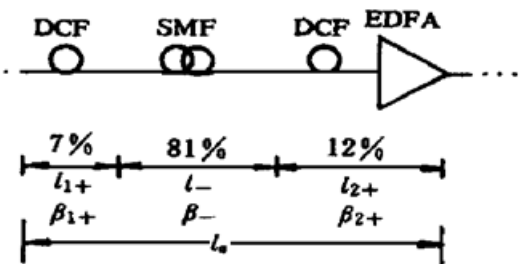


Fig. 1 Sketch of optical fiber cascaded system model

\* 国家自然科学基金(69678011)和山西省青年科学基金资助项目。

收稿日期: 1998-07-06; 收到修改稿日期: 1998-09-07

现象。在光通信中，这种离合现象会产生严重的误码，必须避免。本文探讨准孤子与一般孤子有何异同；多近的两个准孤子传输时才能最大限度地减小互作用问题。

## 2 理论分析和数值模拟

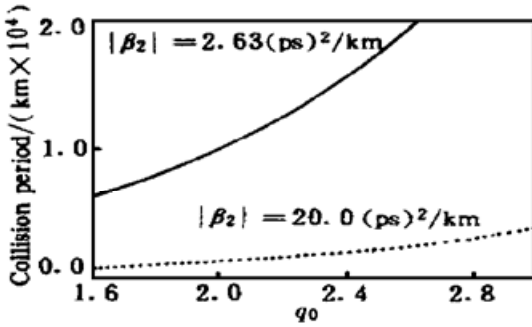
一对准孤子的振幅可写成归一化形式：

$$u(o, \tau) = \operatorname{sech}(\tau - q_0) + \operatorname{sech}(\tau + q_0). \tag{1}$$

文献[7, 8]曾在忽略光纤的损耗的情况下，对普通单模光纤中传输的一对孤子间的相互作用进行过研究，结果表明：一对孤子在传输过程中，先趋向于靠拢，逐步合并成一个脉冲，然后再逐步分开，并重复此过程，它们间的互作用不仅取决于孤子间隔  $q_0$ ，而且也与相对相位  $\theta$  和相对振幅  $r$  有关。对于任意  $q_0$  值，一对孤子由于互作用而表现出的归一化的离合周期(Collision period)，即从入射到完全合并成一个脉冲，再分开到完全恢复入射时状态所经历的距离)为：

$$\xi_p = \pi \sinh(2q_0) \cosh(q_0) / [2q_0 + \sinh(2q_0)], \tag{2}$$

式中  $\xi_p = z_p / L_D$ ， $z_p$  为离合周期， $L_D = T_0^2 / |\beta_2|$  为色散长度， $T_0$  为入射脉冲的初始脉宽。图2



是根据(2)式作出的离合周期随  $q_0$  的变化曲线。

对于普通单模光纤来说， $|\beta_2|$  约为  $20 (\text{ps})^2/\text{km}$ ， $L_D$  约为  $100 \text{ km}$ ，若要使  $z_p > 1000 \text{ km}$  则  $q_0 > 2.0$ 。对于光纤级联准孤子传输系统来说，采用色散补偿和周期放大机制，可使平均剩余色散比普通单模光纤的色散小一个数量级，约为  $|\bar{\beta}_2| \approx 2.62 (\text{ps})^2/\text{km}$ ，并且增益和损耗在一个周期内可达到平衡。这样，一对准孤子以同样的间距入射，它们间的离合周期自然会提高一个量级。

比如当  $q_0 = 2.0$  时， $z_p \approx 10000 \text{ km}$ 。可见光纤级联准孤子传输系统对于避免孤子脉冲间的离合现象，从而消除误码是十分有利的。

若以图1所示系统为模型，来研究光纤级联系统中一对准孤子的传播情况。所以采用这样的配置，是因为通过变分法解非线性薛定谔方程表明<sup>[5]</sup>，对于单个 sech 型脉冲 ( $T_0 = 50 \text{ ps}$ 、峰值功率  $P_0 = 1.38 \text{ mW}$ 、中心波长为  $\lambda = 1550 \text{ nm}$  以及初始啁啾为  $C = 0$ )，光纤参数为  $D_{\text{SMF}} = 18 \text{ ps/nm/km}$ ， $D_{\text{DCF}} = -66 \text{ ps/nm/km}$ ， $\alpha = 0.046/\text{km}$ ， $\gamma = 1.27/\text{km/W}$ ，且放大距离  $l_a = 40 \text{ km}$  时，要想达到稳定传输，且要使单模光纤在一节中的比例尽可能大，必须有： $\xi_{1+} = l_{1+} / l_a = 7\%$ ， $\xi_{-} = l_{-} / l_a = 81\%$ ， $\xi_{2+} = l_{2+} / l_a = 12\%$ 。用分步傅里叶方法进行数值模拟<sup>[6]</sup>，证实了这一点。

当取  $q_0 = 1.763$  时，用分步傅里叶方法得到了：孤子对每传播  $1000 \text{ km}$  的波形(图3)、准孤子对双峰间距随传播距离的变化曲线图(图4)、准孤子对的对称中心幅度随传播距离的变化曲线图(图5)和准孤子对的峰值随传播距离的变化曲线图(图6)。

从宏观上看，光纤级联系统中准孤子对的传输与由单模光纤构成的系统中忽略损耗的孤子对的传输波形一致<sup>[7, 8]</sup>。两准孤子离合周期约为  $7800 \text{ km}$ ，与由(2)式计算

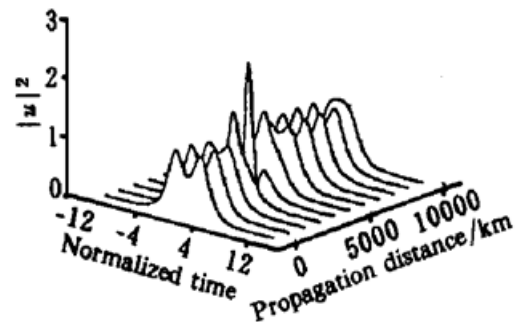


Fig. 3 Wave evolution of the pairs of quasi-soliton

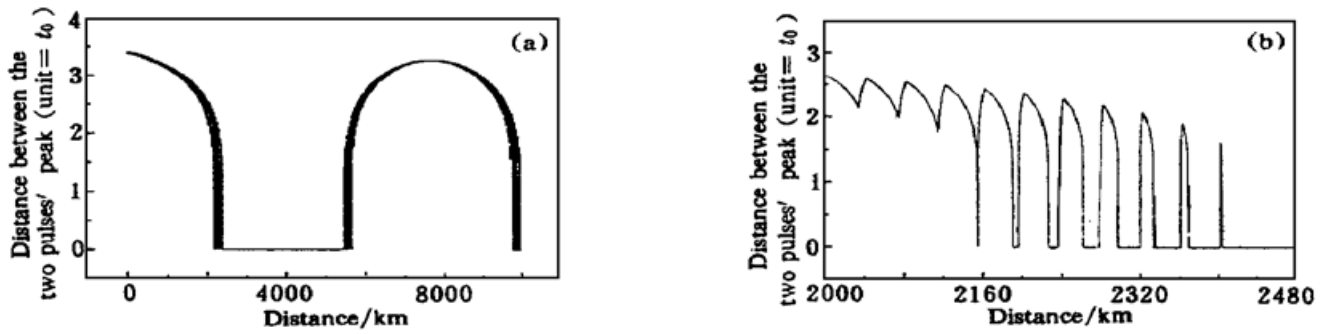


Fig. 4 (a) Relationship of distance between the two pulses' peak and propagation distance, (b)

Partly amplified map of Fig. 4 (a)

结果也一致,说明光纤级联系统中准孤子对的传输同样可由(2)式描述。由图 6(a),可将离合周期分成三个区域,在2155 km 到5680 km 范围内两准孤子合成了一个脉冲,该区域可叫做两脉冲“合并区”,而在0~ 2000 km (或5680~ 7800 km) 范围内,准孤子对的双峰峰值变化不大,而两准孤子双峰间距在逐步变小(或变大),这个区域可叫做两脉冲“分离区”。在 $z = 0$ 处,两准孤子对的间距为 $q_0 = 2 \times 1.762$ 。随着传输距离增长,两准孤子对双峰间距逐渐下降,同时准孤子对的对称中心的幅

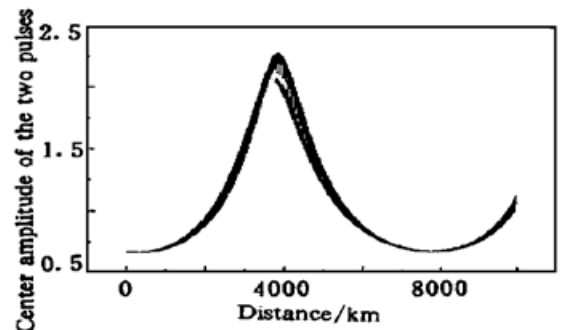


Fig. 5 Relationship of center amplitude of the two pulses and propagation distance

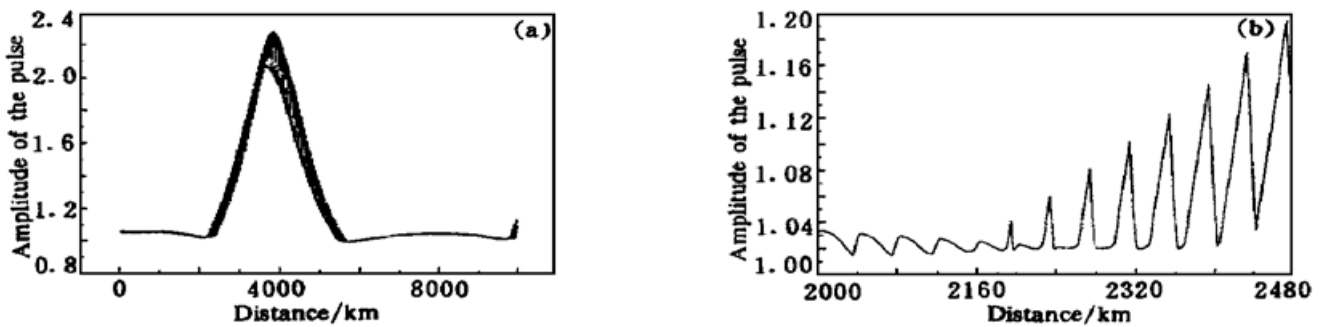


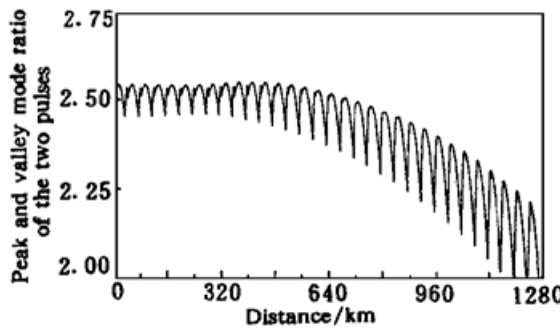
Fig. 6 (a) Relationship of amplitude of the two pulses and propagation distance, (b) Partly amplified map of Fig. 6 (a)

度也逐渐增长,可是准孤子的峰值却变化不大,这说明准孤子对的两边外侧能量逐步向中心靠拢,但峰值仍无明显变化。当传播距离 $z = 2155$  km 时,准孤子对双峰间距变为零,以后直到 $z = 3900$  km,间距始终为零,而准孤子对的对称中心的幅度却不断增大,这说明虽然在 $z = 2155$  km 处两准孤子对间双峰间距为零,但实际上这两个准孤子正在合并过程中,两准孤子中心幅度在脉冲波形中已成为极大,而在中心极大两边还有两“肩”,这说明合并还未全部完成(如图 3)。随着传输距离增长,准孤子对称中心幅度继续增大,直到 $z = 3900$  km,准孤子中心幅度增到最大,准孤子对的峰值也增到最大,这时两准孤子已完成合并。以后随着传输距离增长,准孤子对逐渐分离,从 $z = 3900$  km 到 $z = 5680$  km,两准孤子波形的对称中心处是一个峰值且在逐渐下降(见图 3)。从 $z = 5680$  km 起,两准孤子波形两侧的峰值逐渐显露出来,进入两脉冲“分离区”,准孤子对双峰间距开始由零上升,直到 $z = 7800$  km 时,两准孤子又恢复为入射时的状态,如图 3 所示。

但从微观上看,两者又不一致。图 4(b)和图 6(b)给出了准孤子对峰值和两准孤子双峰

间距从  $z = 2000 \text{ km}$  到  $2480 \text{ km}$  演化的精细情况。本文以  $z = 2080 \text{ km}$  开始的一节为例来分析, 从该节的起点起, 孤子对峰值幅度在色散补偿光纤中上升、在单模光纤中下降、再在色散补偿光纤中上升, 对应的两准孤子双峰间距在色散补偿光纤中远离、在单模光纤中靠近、再在色散补偿光纤中远离。在此区域附近, 两脉冲的峰值的相对变化幅度较小, 约为  $\pm 1\%$ , 而两准孤子双峰间距相对变化约为  $\pm 20\%$ 。在  $z = 2160 \text{ km}$  以后, 即分离区与合并区的交界处, 这种情况发生明显转变。例如在  $z = 2400 \text{ km}$  附近, 每一周期里, 孤子对峰值幅度在色散补偿光纤中下降、在单模光纤中上升、再在色散补偿光纤中下降, 对应的两准孤子双峰间距在色散补偿光纤中靠近、在单模光纤中远离又迅速合并、在色散补偿光纤中继续处于合并过程中。前后两种相反的现象主要是由于脉冲在光纤中传播时, 峰值上升或下降(对应于脉宽压缩与展宽)主要取决于  $\beta C$  的符号, 而脉冲在色散补偿光纤与单模光纤中获得的啁啾符号相反, 不断积累的结果, 使得从  $z = 2160 \text{ km}$  开始的一节中与从  $z = 2400 \text{ km}$  开始的一节中对应的啁啾符号相反, 从而导致相反的结果。这一点, 在本文以前关于数值模拟的论文<sup>[6]</sup>中已有分析。另外, 由图 5 和图 6(a) 可以看出, 在  $z = 3900 \text{ km}$  附近, 两准孤子已经合并成一个脉冲, 准孤子对双峰间距为零, 双峰合并为单峰, 单峰幅度约为入射时单个脉冲幅度的 2.2 倍(在普通的双孤子传输系统中, 双峰合并为单峰后, 单峰幅度约为入射时单个脉冲幅度的 2.0 倍)。在色散补偿光纤和单模光纤中, 两脉冲的峰值的相对变化也比较剧烈, 约为  $\pm 8\%$ , 比分离区大 8 倍。

但对于实际传输系统来说, 若以两脉冲对称中心幅度下降到峰值功率的一半所对应幅度



为两光脉冲可分辨的判据, 则由(1)式可知,  $q_0$  有一个截止值,  $q_{th} \approx 1.625$ 。在入射端必须满足  $q_0 > 1.625$ , 那么满足这一条件的准孤子对能传输多远还是可分辨的呢? 图 7 给出了  $q_0 = 1.763$  时, 准孤子对峰谷模方比随传播距离的变化曲线, 由图可见, 在  $z < 1120 \text{ km}$  区域, 准孤子对是可分辨的, 通常把这一区域称为可分辨区域。光通信时, 应在该区域进行。

Fig. 7 Relationship of peak and valley moderatio of the two pulses and propagation distance when  $q_0 = 1.763$

以上是以  $q_0 = 1.763$  为例阐明准孤子在光纤级联系统中传播的特性。经数值模拟, 可给出如下结果(表 1):

Table 1. Relationship between collision period, distinguishable area and  $q_0$

$q_0$	collision period/km	distinguishable area/km
1.763	about 8000	0~ 1160
2.0	about 10000	0~ 2400
3.0	about 30000	0~ 10000

结 论 通过对光纤级联系统中一对准孤子的传输特性研究, 可以得到如下结论:

1) 光纤级联系统中一对准孤子的宏观传输特性与由单模光纤构成的系统中忽略损耗的孤子对的传输特性一致。但光纤级联系统中一对准孤子的传输还具有微观传输特性。合并过程中, 在色散补偿光纤和单模光纤中, 内部振荡不断加剧, 单峰幅度最大超过双峰幅度的 2 倍。

2) 准孤子间相互作用对系统传输容量和距离有比较强的制约。由表 1 可知, 当脉宽为 50 ps, 在本文的条件下, 当  $q_0$  分别为 1.763、2.0 和 3.0 时, 可分辨区域分别可以达到 1160 km、2400 km 和 10000 km 左右, 这时系统容量分别为 5.68 Gbit/s、5.0 Gbit/s 和 3.3 Gbit/s。

3) 由于光纤级联准孤子传输系统的平均剩余色散比用普通标准单模光纤构成的系统的色散要小一个数量级, 所以更有利于孤子脉冲的传送。

### 参 考 文 献

- [1] Hasegawa A, Kodama Y J. Guiding-center soliton in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(24) : 1443~1445
- [2] Gabitov L, Shapiro E G, Turitsyn S K. Optical pulse dynamics in fiber links with dispersion compensation. *Opt. Commun.*, 1997, **134**(1~ 6) : 317~ 329
- [3] Smith N J, Knox F M, Doran N J *et al.*. Enhanced power solitons in optical fibers with periodic dispersion management. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(1) : 54~ 55
- [4] Tang X Y, Chin M K, Tan H S. Quasi-stable soliton transmission in a long-distance fibre link with periodic dispersion management and amplifiers. *Opt. Commun.*, 1997, **136**(5~ 6) : 379~ 384
- [5] Zhou Guosheng, Li Xueming, Li Zhonghao *et al.*. Quasi-soliton in optical fiber link with periodical dispersion management and power balance. *Proc. SPIE*, 1998. 323~ 327
- [6] 薛文瑞, 李学敏, 李仲豪等. 光纤级联系统中准孤子传输的数值模拟. 电子学报, 1989, **27**(9) : 52~ 55
- [7] Gordon J P. Interaction forces among solitons in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(11) : 596~ 599
- [8] Blow K J, Doran N J. Bandwidth limits of nonlinear (soliton) optical communication system. *Electron. Lett.*, 1983, **19**(11) : 429~ 430

## Interaction of Two Quasi-Solitons and its Restriction of Transmission Capacity and Distance

Xue Wenrui<sup>1)</sup>    Li Xueming<sup>2)</sup>    Li Zhonghao<sup>2)</sup>    Zhou Guosheng<sup>2), 3)</sup>

1), Department of Physics, Shanxi University, Taiyuan 030006

2), Department of Electronics and Information, Shanxi University, Taiyuan 030006

3), National Laboratory on Local Fiber-Optic Communication Networks &

Advanced Optical Communication System, Electronics Department, Beijing University, Beijing 100871

(Received 6 July 1998; revised 7 September 1998)

**Abstract** Interaction of two quasi-solitons propagated in optical fiber cascaded system and its restriction of transmission capacity and distance is studied by theoretical analysis and numerical simulation. The meticulous transmission process of quasi-solitons is analyzed.

**Key words** optical fiber cascaded system, quasi-soliton, interaction.