

光孤子脉冲保形传输的数值分析与讨论

蔡 托, 张小伟, 丁三红

(黔南民族师范学院物理与电子科学系, 贵州 都匀 558000)

摘 要:基于光孤子传输所遵从的非线性薛定谔方程(NLSE),参照相关的实验数据,借助MATLAB的计算和绘图功能对光孤子脉冲在普通单模石英光纤中得以保形传输的条件进行了数值模拟,得到了在给定光纤参数下孤子脉冲的截止脉宽。

关键词:孤子脉冲;保形;参数;截止脉宽

中图分类号:0437 **文献标识码:**A

Numerical analysis and discussion on optical soliton pulse conformal transmission

CAI Tuo, ZHANG Xiao-wei, DING San-hong

(Dept. of Physics & Electronic Science, Qiannan Normal College for Nationalities, Duyu 558000 China)

Abstract: Based on the nonlinear Schrödinger (NLS) equation and using the MATLAB, numerical analysis was made to simulate the transmission of optical soliton pulse in mono-mode quartz fiber. The condition for conformal transmission was analyzed. Model was set up with which one can calculate the minimum pulse width for conformal transmission. The factors that decide the minimum pulse width include the chirp modulation coefficient, the parameters of the fiber, etc. The result and conclusion can be referenced when dealing with the field of high speed soliton communication.

Key words: soliton pulse; conformal; parameters; closure pulse width

1 引 言

非线性光纤光孤子通信是一种全新的超高速、超大容量、超长距离的通信技术,信息传输容量比现在最好的光纤通信系统还要高出1~2个数量级,它将成为21世纪的主要系统。

在1995年以前,光孤子通信理论与技术就已达到了很高的水平,充分显示了光孤子通信的高速大容量的能力,但是技术难度较高,耗资巨大,各国的高速长距离传输试验都在实验室内用环路模拟来实现,无法进行野外现场试验,不易工程化和实用化。1995年以来,各国光孤子通信的研究工作者开始考虑如何使先进的构思和实验技术走出实验室。首先开始这项探索的是日本的NTT实验室,他们将孤子传输技术在东京周围的城域网中进行现场通信试验,取得了令人振奋的结果。其方案是在已铺设的光缆上采用色散管理技术,实现了 $10 \text{ Gbit/s} \times 3000 \text{ km}$ 和

$20 \text{ Gbit/s} \times 1000 \text{ km}$ 低误码或无误码传输^[1]。第一次野外现场试验的成功激励了各国光孤子通信走向工程实用化的研究。

我国在光孤子通信技术的研究中也取得了一定的成果,国家“863”研究项目成功地进行了光时分复用(OTDM)光孤子通信关键技术的研究,实现了 $20 \text{ Gbit/s} \times 105 \text{ km}$ 的传输^[2]。

光孤子通信研究的最终目标是实现光孤子脉冲长距离的保形传输。为此,本文仅就某一特定光纤中可保形传输的高斯脉冲的截止脉宽作一探讨,以作为整个光孤子通信研究的些许补充。

基金项目:贵州省省长基金课题(No. 200847)资助。

作者简介:蔡 托(1953-),男,硕士,副教授,主要研究方向是基本粒子理论,广义相对论和非线性物理系统,近年来侧重于非线性光学和光孤子通信理论的探讨。E-mail: ct163001@sina.com

收稿日期:2010-05-05

2 理论模型

根据 Maxwell 电磁场方程组,可推得光脉冲在非线性能散光纤中场量演化所满足的方程,即所谓的标准非线性薛定谔方程(SNLSE)^[3],而当光脉冲的宽度小于 100 fs 时,其演化规律将由下面的广义非线性薛定谔方程^[3]来描述:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{\alpha}{2}A - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 u}{\partial T^3} = i\gamma \left[|A|^2 A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \right] \quad (1)$$

式中, A 是电场的复振幅包络; z 是脉冲在光纤中传输的距离; $T = t - z/v_g \equiv t - \beta_1 z$ 是在以群速度 $v_g = 1/\beta_1$ 运动的参考系中的时间量度; α 是光纤损耗系数; β_2 和 β_3 分别对应于二阶、三阶色散; γ 是非线性系数。式(1)最后两项分别表示脉冲的自陡峭和内拉曼散射效应。

若光脉冲的峰值功率很高或光纤材料具有高的非线性折射率,则五阶非线性效应将不容忽略,即此时需考虑光纤介质电极化强度的五阶项和更高阶项,一个简单的近似是将式(1)中的非线性参量 γ 表示为^[3]:

$$\gamma \approx \gamma_0 (1 + b |A|^2) \quad (2)$$

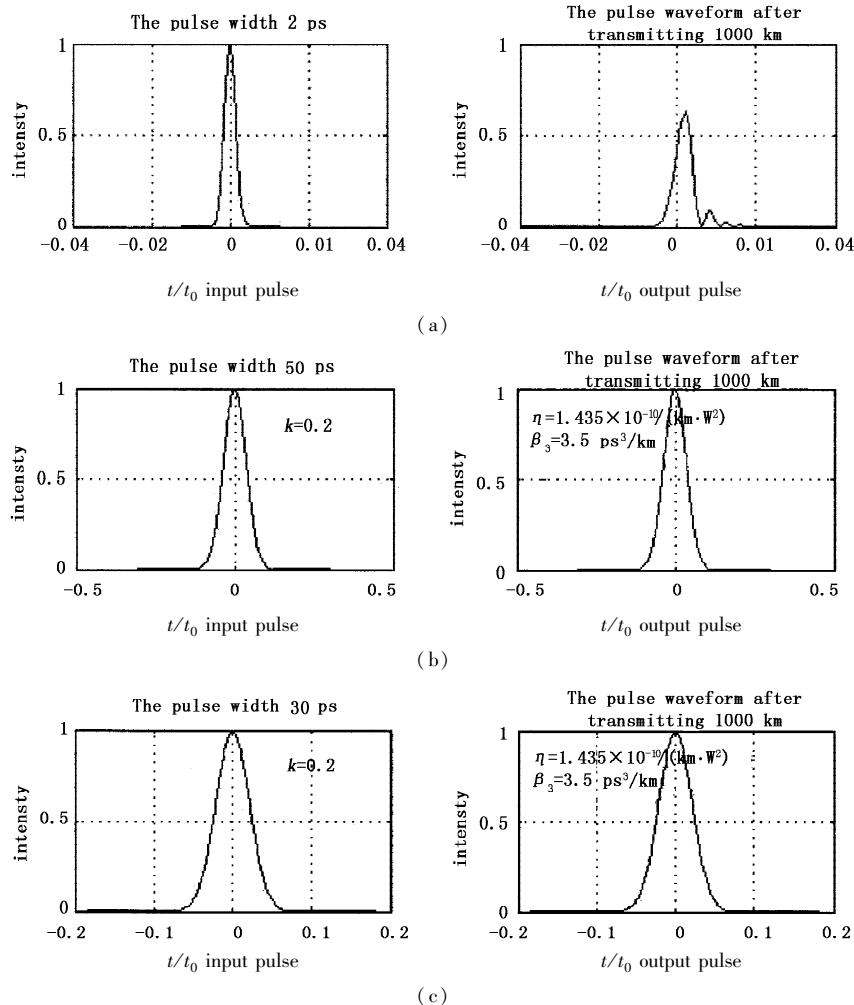
式中, b 为决定非线性开始饱和时的功率参量。于是方程(1)可改写为如下形式:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{\alpha}{2}A - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 u}{\partial T^3} = i\gamma_1 |A|^2 A + i\eta |A|^4 A - \frac{\gamma}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} (|A|^2 A) - i\gamma T_R A \frac{\partial |A|^2}{\partial T} \quad (3)$$

式中, $\gamma_1 (= \gamma_0)$ 和 $\eta (= \gamma_0 b)$ 分别为三阶和五阶非线性系数。在本文中,假设高斯型脉冲的脉宽限于皮秒量级,此时自陡和非线性响应延迟效应不明显^[3],故式(3)中右边后两项可忽略。此外,光纤损耗在现在的技术条件下已完全可通过各种放大手段加以解决,于是可假设光纤不存在损耗,故可略去左边第三项,于是式(3)简化为:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 u}{\partial T^3} = i\gamma_1 |A|^2 A + i\eta |A|^4 A \quad (4)$$

式(4)即为具有高入纤功率的皮秒光脉冲(具体脉宽如图 1(a)~(f)所示)在光纤中演化的理论依据。



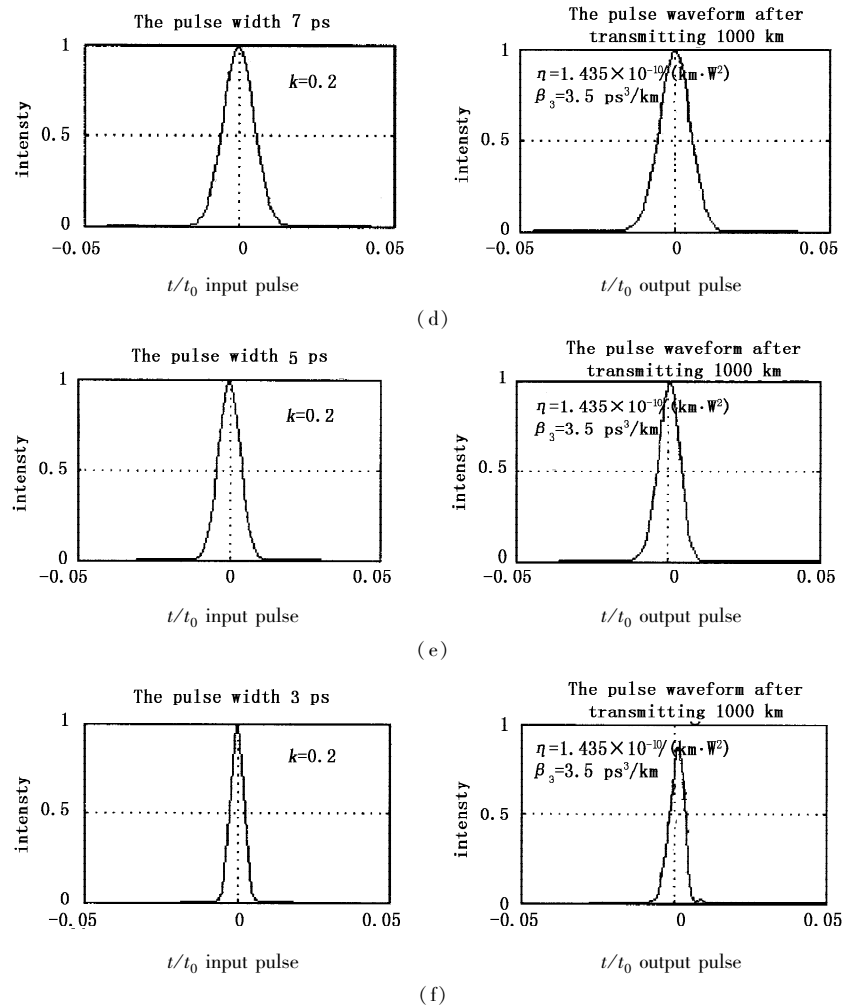


图1 初始高斯脉冲啾啾 $k=0.2$ 时,具有不同脉宽入纤脉冲传输 1000 km 时的输出脉冲波形

Fig. 1 the output waveform of the Gauss pulse with different pulse width and the chirp coefficient $k=0.2$ after transmitting 1000 km

3 特定光纤中保形截止脉宽的数值模拟与分析

在目前的数学技术条件下,方程(4)仍被视为不可积系统,即无法求其解析解,故只能采用近似方法或数值方法求解,本文将采用对称分步傅里叶快速算法并借助功能强大的 Matlab7.1 求其数值解。

3.1 输入脉冲具有确定啾啾时的保形截止脉宽

下面计算所选用的光纤为纤芯无掺杂的单模石英光纤,根据 SPM 技术^[3]测得其非线性折射率 $n_2 = 2.36 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$,其他参数^[3]分别选为:中心波长 $\lambda_0 = 1.55 \text{ }\mu\text{m}$,脉冲啾啾 $k=0.2$,脉冲峰功率 $p_0 = 10^{-3} \text{ W}$, $\gamma_1 = 9.57 \times 10^{-8}/(\text{km} \cdot \text{W})$; $\beta_3 = 3.5 \text{ ps}^3/\text{km}$; $\eta = 1.435 \times 10^{-19}/(\text{km} \cdot \text{W}^2)$;传输距离 $L = 1000 \text{ km}$;初始条件(入纤脉冲)为 $A(0, T) = A_0 \cdot \exp\left[-\frac{1+ik}{2}\left(\frac{T}{T_0}\right)^2\right]$,不同脉宽示于各图的输入脉冲的标题中。为便于比较和分析,对不同宽度的脉冲分别绘出了输入脉冲和传输 1000 km 时的输

出脉冲波形。

由图 1(a)可见,当入纤高斯脉冲的脉宽为 2 ps 时,传输 1000 km 后其输出脉冲波形已明显畸变,出现了严重的拖尾振荡现象,主峰振幅仅约为入纤脉冲振幅的 1/2,且其中心明显向振荡一沿偏移,即 2 ps 及更窄的脉冲实际上已不能在此类光纤中保形传输;而当输入脉冲宽度为 50 ps(如图 1(b)所示)时,即便传输了 1000 km,但输出的脉冲波形没有任何失真。由此可知,能够在此类光纤中得以保形传输的高斯脉冲的截止脉宽必在这两者之间,通过进一步的夹逼计算可知(如图 1(c)、图 1(d)、图 1(e)、图 1(f)所示),当输入脉宽为 5 ps 时(如图 1(e)所示),输出脉冲虽然几乎没有任何失真,但其中心已开始向一侧偏移;而当输入脉宽为 3 ps 时(如图 1(f)所示),经传输 1000 km 后其输出脉冲幅度已开始明显下降,且脉峰中心发生显著的偏移并开始出现拖尾振荡。由图 1(c)和图 1(d)可见,入纤脉宽从 30 ps 直到 7 ps 仍能

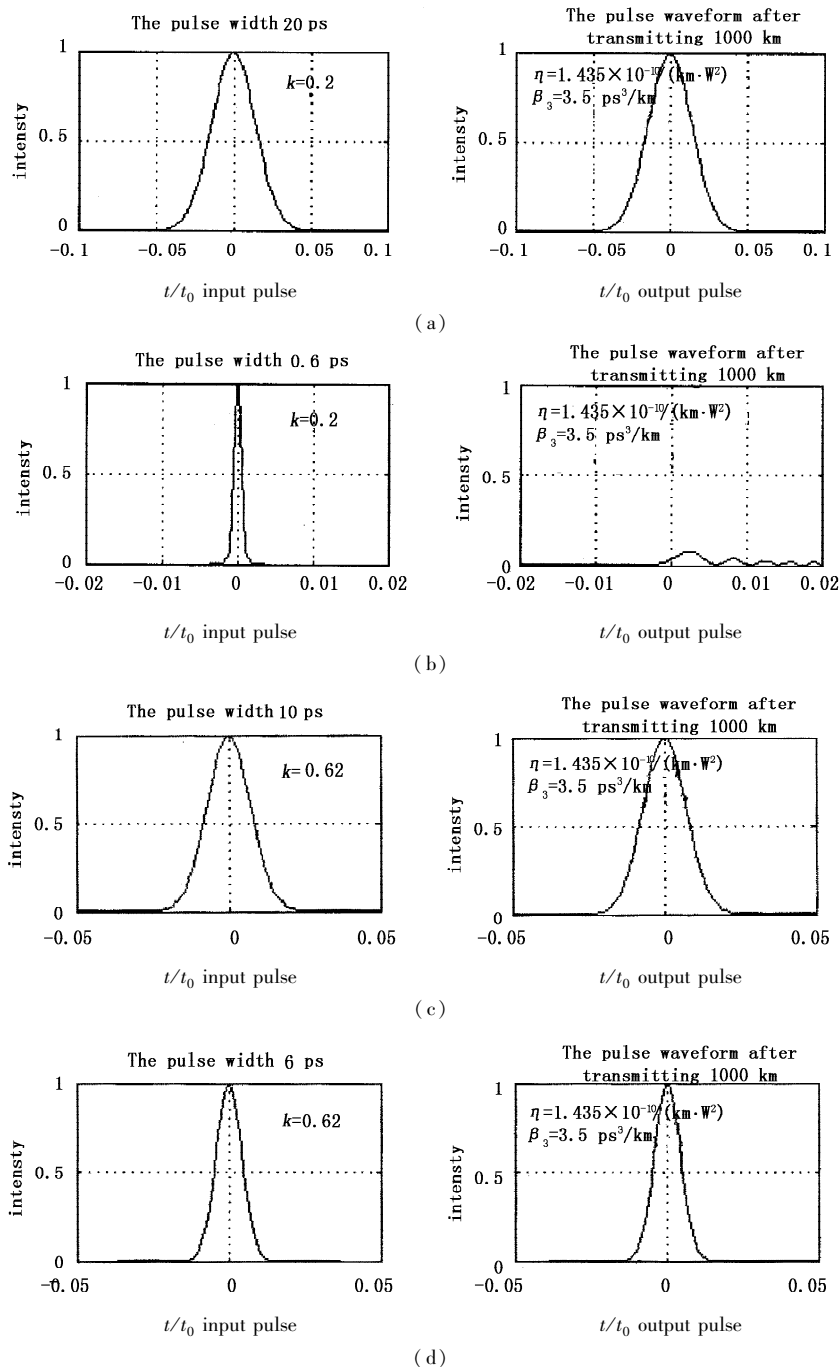
保形传输 1000 km, 这表明, 对于纤芯无掺杂的单模石英光纤, 在其中能够保形传输具有初始啁啾 $k=0.2$ 的高斯脉冲的截止脉宽应为 $T_{0c}=7$ ps。

3.2 啁啾参数对截止脉宽的影响

现在讨论输入脉冲的初始啁啾对截止脉宽的调制作用, 计算结果如图 2 所示。

从图 2 可见, 在其他参数不变而输入高斯脉冲的初始啁啾取 $k=0.62$ 时, 截止脉冲宽度发生了变化, 图 2(a)、图 2(b) 表明, 当输入脉宽为 20 ps 时, 经传输 1000 km 时其输出脉冲波形毫无失真, 而当输入脉宽为 0.6 ps 时, 其输出脉冲波形

的幅度约为初始脉冲幅值的 1/10, 脉冲中心几乎完全偏移且出现明显的拖尾振荡, 可以确定此情形下的截止脉宽必在 20 ps 和 0.6 ps 之间。通过进一步夹逼计算, 如图 2(c)、图 2(d) 所示, 此时的截止脉宽应为 $T_{0c}=6$ ps。若输入脉冲的啁啾参数增加到 1.45, 如图 2(e) 所示, 尽管此时输入脉冲宽度仍为 6 ps, 但此时的输出波形已明显被压缩, 峰值升高且脉冲一侧开始变陡; 当啁啾参数增加到 2.15 时, 如图 2(f) 所示, 输出脉冲已被严重压缩, 峰值增加更大, 一侧陡化更严重, 脉冲原有的对称性遭到明显的破坏, 输出脉冲严重畸形。



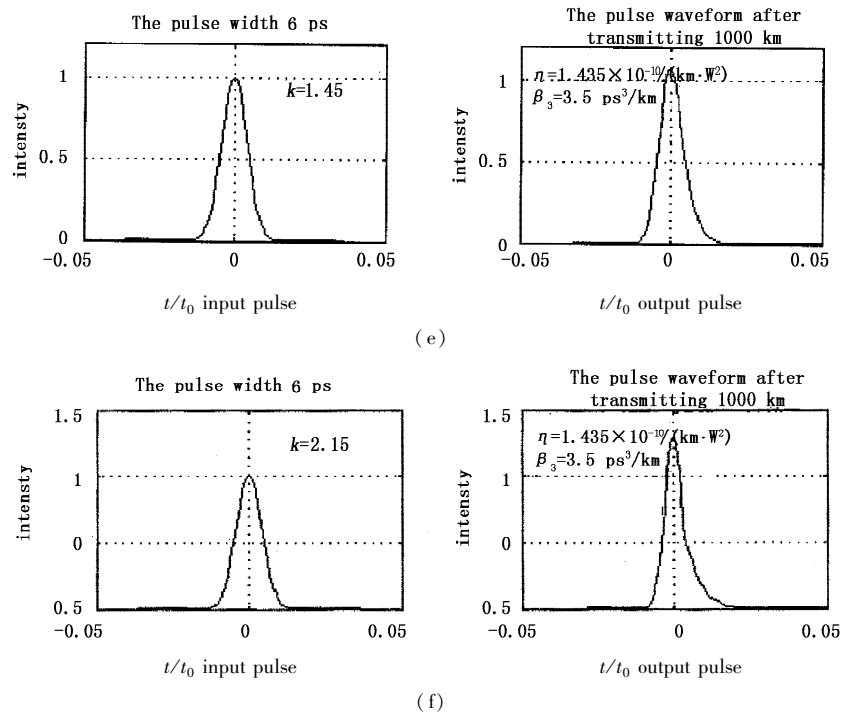


图2 啁啾参数对截止脉冲宽度的影响

Fig. 2 the influence of chirp to the closure pulse width

3 结论

由上面的数值计算和分析可以得出结论:对于某一特定光纤,能够在其中得以保形传输的孤子脉冲宽度存在着一个下限——截止脉宽 T_{oc} ,当入纤脉冲宽度小于截止脉宽时,孤子脉冲将无法保形传输;而对同一特定光纤,在一定范围内调整输入高斯脉冲的啁啾参数,却能够使保形传输脉宽下限有所变窄,即可利用更窄脉宽的光孤子作为通信载体,这对提高通信容量和码速具有一定的参考价值。值得注意的是,若初始啁啾过大,其结果恰好相反,输入脉冲将必须具有更大的截止脉宽才能保形传输,甚至会导致孤子脉冲在传输过程中严重失真。

参考文献:

- [1] Gui Hou-yi. Optical soliton communications & forecast [J]. Technical Front, 2005, (3): 19. (in Chinese)
桂厚义. 光孤子通信及其展望[J]. 技术前沿, 2005, (3): 19.
- [2] Cai Ju, Yang Xiang-lin. The present and future of optical soliton communication[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2003, 24(1): 69. (in Chinese)
蔡炬, 杨祥林. 光孤子通信技术的现状与未来[J]. 半导体光电, 2003, 24(1): 69.
- [3] Govind P Agrawal. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics [M]. Elsevier Science (USA), 2001.