

压缩平稳重调脉冲的色散渐减光纤的设计*

张玉龙 张爱玲†

(天津理工大学计算机与通信工程学院, 天津市薄膜电子与通信器件重点实验室, 教育部通信器件与技术工程研究中心, 天津 300384)

(2010 年 11 月 24 日收到; 2011 年 1 月 30 日收到修改稿)

文章根据平稳重调脉冲(SRP)在梳状光纤(CPF)结构中的压缩原理, 对色散渐减光纤(DDF)的色散特性进行设计, 结果发现该色散渐减光纤的色散特性呈线性递减. 对于平稳重调脉冲其压缩比与功率比等于光纤始末两端二阶色散系数的比值. 当色散渐减光纤的斜率足够小时, 无啁啾基阶孤子可以近似为平稳重调脉冲, 当色散渐减光纤的色散斜率较大时, 无啁啾基阶孤子不能近似为平稳重调脉冲. 当基阶孤子带有与光纤色散斜率成正比的线性啁啾时, 脉冲的压缩比与功率比更接近于光纤始末两端二阶色散系数的比值. 说明带有线性啁啾的基阶孤子比不带啁啾的基阶孤子更接近于平稳重调脉冲.

关键词: 平稳重调脉冲(SRP), 梳状光纤(CPF), 色散渐减光纤(DDF), 色散递减表达式

PACS: 42.65.-K, 42.81.-i

1. 引言

在高速光纤通信系统中, 每个信道的比特率通常超过 40 Gbit/s, 因此超短光脉冲的产生成为光发射机的重要部分. 主动锁模激光器或直接调制光源产生的超短光脉冲其脉冲宽度通常在皮秒量级, 达不到要求. 利用光纤中的非线性效应对皮秒脉冲进行压缩可以得到飞秒量级的超短光脉冲. 脉冲压缩技术特别是绝热孤子压缩技术由于其产生的旁瓣小, 能量损耗低引起人们的广泛关注. 常用的绝热孤子压缩光纤为色散渐减光纤(DDF). 色散渐减光纤的概念是在 1987 年由日本学者 Tjima 首次提出的^[1]. 该光纤的二阶色散系数 $|\beta|$ 沿脉冲的传输方向渐减, 被广泛应用于绝热孤子压缩和高阶孤子压缩^[2-4]. 但高阶孤子压缩容易造成较大的脉冲基座, 增大噪声^[5]. 绝热孤子压缩没有能量损耗, 可以得到高质量的压缩脉冲, 压缩后脉冲无基座^[6,7].

最近人们利用平稳重调脉冲(stationary rescaled pulse)在梳状光纤(comblike profiled fiber)、交替连接积累的非线性扰动光纤(alternately concatenated fiber with accumulated nonlinear perturbation)及色散

渐减光纤中的传输实现对脉冲的压缩^[8-10], 这些光纤积累的色散及积累的非线性的比值呈周期性减小. 平稳重调脉冲经过每个周期所得到的压缩比相同(假设为 R), 则经过 N 个这样的压缩周期, 脉冲宽度就被压缩到原来的 $1/R^N$, 脉冲峰值功率增大为原来的 R^N 倍. 由于平稳重调脉冲在每个周期中满足相同的脉冲函数, 压缩后的脉冲形状不变, 没有基座, 也没有能量损耗. 其脉冲压缩质量很高, 满足理想化的脉冲压缩要求. 但梳状光纤, 非线性周期性扰动光纤在连接过程中有不可忽略的损耗, 而色散渐减光纤不存在这样的连接损耗. 色散渐减光纤其色散及非线性的比值沿光纤方向渐减, 满足平稳重调脉冲的传输条件, 因此利用色散渐减光纤压缩平稳重调脉冲具有显著的优势. 本文根据平稳重调脉冲在梳状光纤中传输及压缩原理, 以平稳重调脉冲作为初始输入脉冲, 设计色散渐减光纤, 并对该光纤的平稳重调脉冲进行讨论.

2. 理论分析

光脉冲在光纤中传输时所满足的非线性薛定谔方程可表示为^[11]

* 教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-07-0611)、天津市科技计划资助面上项目(批准号: 08JCYBJC14500)和国家自然科学基金(批准号: 60808004)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: alzhang99@hotmail.com

$$i \frac{\partial u}{\partial S} + \frac{e(S)}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + u^2 u = 0, \quad (1)$$

其中 $u(S, t)$ 表示光脉冲电场分量的包络, $S = \gamma a_0^2 (1 - \exp(-\alpha z)) / \alpha$, 表示与非线性系数、损耗、实际的物理传输距离相关的有效传输距离, α 为光纤的损耗系数, z 为沿光纤方向实际物理距离, t 表示相对于群速度的时延. $e(S)$ 为光纤的有效色散, 可表示为

$$e(S) = \frac{-\beta(S)}{\gamma a_0^2 \exp(-\alpha S)}, \quad (2)$$

其中 $\beta(S)$ 为光纤的二阶色散系数, γ 为光纤的非线性系数, $a_0 = \sqrt{\frac{L}{L_{\text{eff}}}}$, L 为光纤非线性、光纤损耗、光纤色散随着长度变化的共同周期^[11], $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha L)] / \alpha$.

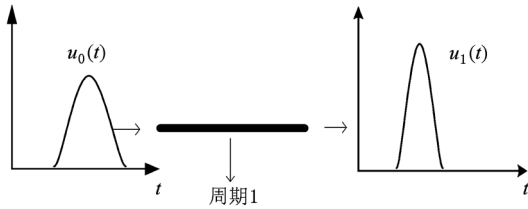


图1 输入脉冲经过一个光纤周期

假设初始输入脉冲 $u_0(t)$ 经过一段有效色散为 $e(S)$ 的光纤(周期1, 如图1所示), 满足非线性薛定谔方程(1), 假设脉冲在光纤中传输时其形状保持不变, 且可表示为

$$u_1(t) = \sqrt{R} u_0(Rt). \quad (3)$$

脉冲 $u_1(t)$ 经过一段有效色散为 $e'(S)$ 的光纤(周期2, 如图2所示), 仍然满足非线性薛定谔方程(1).

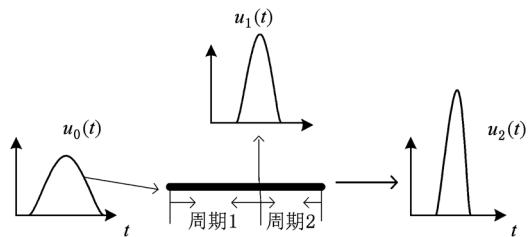


图2 输入脉冲经过两个光纤周期

将(3)式代入到薛定谔方程(1)中, 此时光纤的有效色散为 $e'(S)$, 引入新的参量 $\rho = RS$, $\tau = Rt$, 方程(1)变为

$$i \frac{\partial u}{\partial \rho} + \frac{e'(\rho/R)R}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} + u^2 u = 0. \quad (4)$$

根据(2)式, 光纤的有效色散 $e(\rho)$ 与光纤的二阶色散系数 β , 非线性系数 γ , 光纤的损耗系数 α 有关. 对照(1)式和(4)式, 只要周期1光纤的有效色散是周期2光纤的有效色散的 R 倍, 即 $e'(\rho/R)R = e(\rho)$, 那么脉冲 $u_0(t)$ 在周期1中传输规律与脉冲 $u_1(t)$ 在周期2中传输规律一致.

不考虑光纤损耗 α , 方程(2)中的 $a(S) = 1$. 光纤的有效色散仅与光纤的二阶色散系数和非线性系数的比值有关. 只要第 n 个周期光纤的 β/γ 比值是第 $n+1$ 周期光纤的 β'/γ' 比值的 R 倍, 脉冲在每个周期中的压缩比就均为 R . 经过 N 个周期后, 脉冲压缩为 $u_N(t) = \sqrt{R^N} u(R^N t)$. 根据 $\rho = RS$, 第 n 个周期的光纤长度是第 $n+1$ 个周期的光纤长度的 R 倍.

$u_0(t)$ 和 $u_1(t)$ 要满足表达式(3), 输入脉冲 $u_0(t)$ 必须为平稳重调脉冲, 即脉冲在压缩过程中无能量损失, 其可以通过下述过程求得^[8]. 首先输入双曲正割形脉冲 $u_0^{(0)}(t) = \sqrt{P_0} \text{sech}(t)$ 或者高斯脉冲到光纤周期1中, 得到输出脉冲 $u_1^{(0)}(t)$, 达到压缩比为 R , 用(3)式重新调节脉冲为 $u_{\text{调}}^{(0)}(t) = 1/\sqrt{R} u_1^{(0)}(t/R)$. 根据(5)式, 取初始输入脉冲和重调脉冲的平均

$$u_0^1(t) = 1/2 \left\{ u_0^{(0)}(t) + \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{调}}^{(0)}}} u_{\text{调}}^{(0)}(t) \times \exp[-i\theta_{\text{调}}^{(0)}] \right\}. \quad (5)$$

$P_{\text{调}}^{(0)}, \theta_{\text{调}}^{(0)}$ 是在 $t = 0$ 时脉冲 $u_{\text{调}}^{(0)}(t)$ 的峰值功率和相位. 根据经验使 $u_0^1(t)$ 作为输入脉冲, 重复上述步骤多次得到 $u_0^n(t)$ (n 一般取 200 就可以了) 就可以得到非常接近 SRP 的光脉冲了.

3. DDF 的设计

假设 DDF 的非线性系数不变, 要满足 $e'(\rho/R)R = e(\rho)$, 第 n ($n = 1, 2, \dots, N$) 个周期光纤的色散系数 β 是第 $n+1$ 周期光纤的色散系数 β' 的 R 倍, 且第 n 个周期的光纤长度是第 $n+1$ 个周期的光纤长度的 R 倍. 则经过 N 个光纤周期, 输出脉冲为 $u_N(t) = \sqrt{R^N} u(R^N t)$, 压缩比为 R^N , 光纤的总长度为

$$L_{\text{总}} = L_1 \left(1 + \frac{1}{R} + \frac{1}{R^2} + \dots + \frac{1}{R^{N-1}} \right) = L_1 (R - 1/R^{N-1}) / (R - 1). \quad (6)$$

同时得到该 DDF 的色散系数呈线性递减, 满足

$$\beta(z) = \frac{\beta_0(1-R)}{RL_1}z + \beta_0, \quad (7)$$

$$z \in [0, L_1(R-1/R^{N-1})/R-1],$$

其中 β_0 为色散渐减光纤的初始色散值, L_1 为第一个周期的光纤长度, z 为物理传输距离.

若该 DDF 的末端色散值为 β'_0 , 则 DDF 色散表达式(7)可以转化为

$$\beta(z) = \frac{\beta'_0 - \beta_0}{L_{\text{总}}}z + \beta_0. \quad (8)$$

第 N 个光纤周期末端的色散系数为初始端的 $1/R^N$, 而输出端脉冲压缩比和功率比都为 R^N . 由此可见, SRP 脉冲经过线性递减的 DDF 其压缩比和功率比均等于初始端与末端色散系数的比值. 假设 SRP 在相应色散渐减光纤中传输距离为 z , 脉冲达到的压缩比为

$$R(z) = \beta_0/\beta(z). \quad (9)$$

结合(3)式和(9)式可知, 相应于 DDF 的平稳重调脉冲经过光纤后其脉冲的压缩比与功率比相等, 均由色散渐减光纤始末端色散系数的比值确定. 推而广之, 该方法不仅适用于 DDF 的设计, 还适用于光纤色散系数和非线性系数的比值递减的光纤.

4. 近似 SRP 的压缩

根据 DDF 的绝热压缩可知, 基阶绝热孤子压缩要求 DDF 的长度要远大于 $8L_D$, 且光纤的色散斜率越小, 越接近于绝热压缩^[12,13]. 在绝热压缩过程中, 脉冲通过逐渐减小宽度, 增大峰值功率始终保持基态孤子特性, 没有能量损耗. 输出脉冲的压缩比和功率比均为 β_0/β'_0 . 由此可见, 相应于绝热孤子压缩的输入脉冲就是线性 DDF 的 SRP, 它具有很高的脉冲质量.

以无啁啾基阶孤子 $u_0(t)$ 输入到 DDF 中, 假设脉冲的峰值功率为 $P = 1 \text{ W}$, 脉冲半高宽为 $\Delta T = 1 \text{ ps}$, DDF 的起始色散为 $\beta_0 = 14 \text{ ps}^2/\text{km}$, DDF 的末端色散为 $\beta'_0 = 1.4 \text{ ps}^2/\text{km}$, DDF 的非线性系数 $\gamma = 14 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$. 保持这些参数不变, 改变光纤的长度, 该光纤的色散斜率发生变化, 则脉冲经过光纤后的压缩比随着光纤长度变化的关系如图 3 实线所示. 由图可见, 脉冲压缩比随着光纤长度的增加而波动增加, 渐趋近于 10, 即是 β_0/β'_0 . 当光纤长度足够长, 即光纤的色散斜率足够小时, 无啁啾基阶孤子的压缩比为 β_0/β'_0 , 此时无啁啾基阶可以近似为 SRP. 当

DDF 的长度较短, 即色散斜率较大时, 脉冲的压缩比与 β_0/β'_0 有明显差别, 此时无啁啾基阶孤子不能近似为 SRP.

根据文献[10], DDF 的 SRP 具有线性啁啾, 且啁啾正比于光纤的色散斜率. 设 $\frac{(\beta_0 - \beta'_0)\Delta T^2}{L\beta_0\gamma P} = C$, 令输入脉冲为带有线性啁啾 C 的基阶孤子脉冲, 即 $u_0(t) = \text{sech}(t/T_0)\exp(-iCt^2/2T_0^2)$, 保持 DDF 始末两端的色散系数和非线性系数不变, 输入脉冲的峰值功率和脉冲宽度不变, 改变 DDF 的长度, 得到线性啁啾基阶孤子脉冲压缩比随 DDF 长度变化的关系, 如图 3 虚线所示. 由图可见, 脉冲压缩比随着光纤长度的增加而波动增加, 渐趋近于 β_0/β'_0 . 对比线性啁啾的基阶孤子脉冲(图 3 虚线)和无啁啾基阶孤子脉冲(图 3 实线), 线性啁啾基阶孤子脉冲压缩比随着长度的增加以更快的速度接近 β_0/β'_0 , 且其波动幅度比无啁啾基阶孤子小. 说明线性啁啾基阶孤子比无啁啾基阶孤子更接近于 SRP. 当光纤色散斜率趋近于 0 时, 带有线性啁啾的基阶孤子就转化为不带啁啾的基阶孤子. 因此, 无啁啾基阶孤子可以看成是当光纤色散斜率趋近于 0 时线性啁啾基阶孤子的特例.

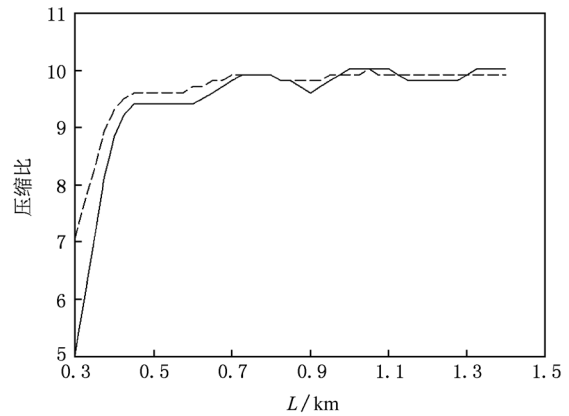


图 3 光纤(DDF)长度分别与无啁啾基阶孤子脉冲(实线)和线性啁啾 C 的基阶孤子达到的压缩比(虚线)的关系

当 $L = 0.8 \text{ km}$ 时, 无啁啾基阶孤子和线性啁啾基阶孤子分别经 DDF 压缩后的输出脉冲及其频谱图如图 4(a) 和(b) 所示. 由图 4(a) 可知线性啁啾基阶孤子经 DDF 压缩后比无啁啾基阶孤子能量损耗更小, 压缩比和功率比更接近 β_0/β'_0 . 图 4(b) 所示线性啁啾孤子经压缩后脉冲频谱没有尖峰出现, 而无啁啾孤子经压缩后其频谱有尖峰出现. 说明线性啁啾孤子经压缩后与无啁啾孤子经压缩后

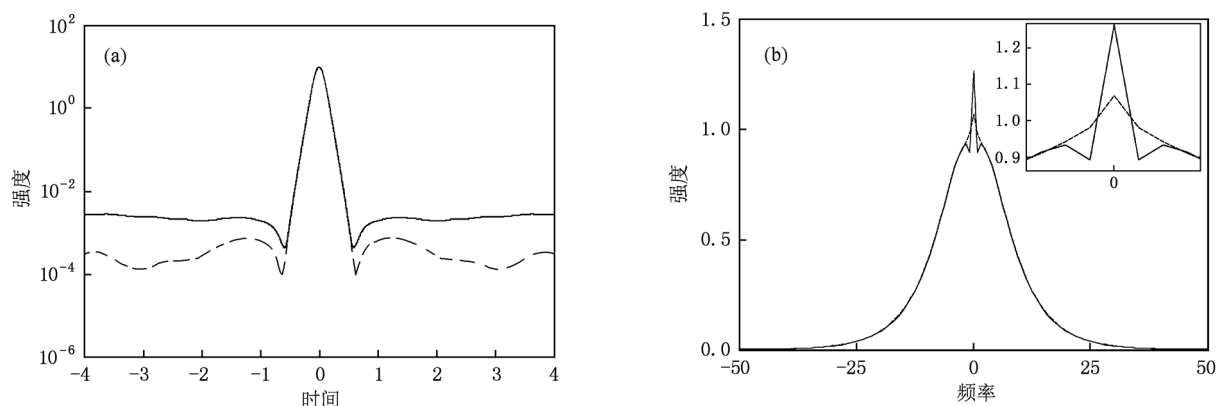


图4 (a)无啁啾基阶孤子(实线)和线性啁啾基阶孤子(虚线)分别经DDF压缩后的输出脉冲;(b)无啁啾基阶孤子(实线)和线性啁啾基阶孤子(虚线)分别经DDF压缩后的输出脉冲频谱

相比有更好的频谱质量.

5. 结 论

本文根据SRP在CPF结构中压缩的基本原理,设计压缩SRP的DDF.设计出来的色散渐减光纤的色散系数为线性递减.输入相应的SRP到该DDF

中,经压缩后脉冲达到的压缩比和功率比应等于 β_0/β'_0 .通过分析可知,随着光纤色散斜率的减小,无啁啾基阶孤子压缩比趋近于 β_0/β'_0 ,说明无啁啾基阶孤子可近似为DDF.带有线性啁啾的基阶孤子的压缩比更快地趋近于 β_0/β'_0 ,且有更好的频谱质量.说明带有线性啁啾的基阶孤子比不带啁啾的基阶孤子更接近于SRP.

- | | |
|---|---|
| <p>[1] Tajima K 1987 <i>Opt. Lett.</i> 12 54</p> <p>[2] Liu J H, Ding Y K, Tan L, Hu Z Y 2004 <i>Acta Phys. Sin.</i> 53 1373 (in Chinese) [刘剑辉、丁永奎、谭莉、胡智勇 2004 物理学报 53 1373]</p> <p>[3] Agrawal G P 2001 <i>Applications of Nonlinear Fiber Optics</i> (New York: Academic) Chapter 6</p> <p>[4] Chernikov S V, Dianov E M, Richardson D J, Payne D N 1993 <i>Opt. Lett.</i> 18 476</p> <p>[5] Nakazawa M, Kubota H, Tamura K 1999 <i>Opt. Lett.</i> 24 318</p> <p>[6] Wu Z H, Cao W H 2004 <i>Laser and Infr.</i> 34 408 (in Chinese) [吴再华、曹文华 2004 激光与红外 34 408]</p> | <p>[7] Reeves-Hall P C, Lewis S A E, Chernikov S V, Taylor J R 2000 <i>Electron. Lett.</i> 36 622</p> <p>[8] Inoue T, Tobioka H, Igarashi K J, Namiki S 2006 <i>J. Lightwave Technol.</i> 24 2510</p> <p>[9] Inoue T, Tobioka H, Namiki S 2005 <i>Phys. Rev. E</i> 72 025601</p> <p>[10] Ozeki Y, Inoue T 2006 <i>Opt. Lett.</i> 31 1606</p> <p>[11] Maruta A, Inoue T, Nonaka Y, Yoshika Y 2002 <i>IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.</i> 8 640</p> <p>[12] Mostofi A, Hatami-Hanza H, Chu P L 1997 <i>IEEE J. Quantum Electron.</i> 33 620</p> <p>[13] Pelusi M D, Liu H F 1997 <i>IEEE J. Quantum Electron.</i> 33 1430</p> |
|---|---|

Design of dispersion decreasing fiber for compressing stationary rescaled pulse^{*}

Zhang Yu-Long Zhang Ai-Ling[†]

(School of Computer and Communication Engineering, Key lab of Film Electronics and Communication Devices of Tianjin, Communication Devices and Technology Engineering Research Center of EMC, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

(Received 24 November 2010; revised manuscript received 30 January 2011)

Abstract

According to the compression principle of stationary rescaled pulse (SRP) in the comb-like optical fiber (CPF), the design of dispersion decreasing fiber (DDF) for compressing stationary rescaled pulse is demonstrated in this paper. The dispersion profile of DDF is found to be decreased linearly. The compression ratio and the power ratio are both equal to the ratio between initial and final values of second order dispersion coefficient when the incident pulse is SRP. When the dispersion slope of the fiber is small enough, the fundamental soliton without chirp can be approximated as SRP. When the dispersion slope of the fiber is high, the fundamental soliton without chirp cannot be approximated as SRP. When the incident pulse is fundamental soliton with linear chirp, which is proportional to the dispersion slope of the fiber, the compression ratio and the power ratio are closer to the ratio between initial and final dispersion values, which indicates that the fundamental soliton with linear chirp is approximated as SRP with less error than fundamental soliton without chirp.

Keywords: SRP (stationary rescaled pulse), CPF (comblike profiled fiber), DDF (dispersion decreasing fiber), dispersion decreasing expression

PACS: 42.65.-K, 42.81.-i

^{*} Project supported by the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-07-0611), Tianjin Natural Science Foundation (Grant No. 08JCYBJC14500), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60808004).

[†] Corresponding author. E-mail: alzhang99@hotmail.com