

色散阶变光纤中啁啾演变的研究*

苗洪利 王 晶

刘秀敏 冯 璐 冯启元

(内蒙古师范大学物理系 呼和浩特 010022) (内蒙古大学物理系 呼和浩特 010021)

提要 给出了色散阶变光纤中群速度色散效应导致的啁啾表达式,采用数值方法模拟了该光纤中的啁啾演变过程。研究表明:色散阶变光纤中的啁啾以色散缓变光纤中啁啾为中心跳跃式变化,逐渐与色散缓变光纤中啁啾重合,且比常规光纤中的啁啾小。

关键词 色散阶变光纤,啁啾,演变

1 引 言

在孤子通信系统成为现实之前,在系统设计中存在许多不可避免的问题,其中之一是光纤损耗的影响。为了补偿和克服光纤损耗,人们采用了许多办法^[1,2],其中拉曼放大方案最适用于实际的光通信系统。然而,除了对常规光纤采用上述方法补偿损耗外,1987年 Tajima 提出了色散缓变光纤^[3],其目的是通过改变光纤几何参数以补偿光纤本身损耗对光脉冲的展宽效应。研究表明,色散缓变光纤可以产生孤子,比常规光纤的性能好。但这种光纤要求 $\beta_2(Z) = \beta_2(0) \cdot \exp(-2\alpha Z)$,因而拉制此种光纤很困难。目前又设计出色散阶变光纤^[4],其每阶的纵向色散是均匀的,阶与阶之间的纵向色散是非均匀的。这种光纤不仅能够维持孤子的稳定传输^[4-6],而且在工艺上非常容易实现。本文研究了色散阶变光纤中啁啾的演变规律,并与常规光纤和色散缓变光纤进行了比较。

2 理论分析

脉冲在光纤中传输满足非线性薛定谔方程

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

式中 A 为脉冲包络的慢变振幅, T 为随脉冲以群速度 V_g 移动的参考系中的时间量度 ($T = t - Z/V_g$), α 为吸收系数, γ 为非线性系数, β_2 为二阶色散参数, Z 为传输距离。

定义归一化振幅 U

$$A(Z, t) = P_0 \exp(-\alpha Z) U(Z, \tau) \quad (2)$$

其中 P_0 为入射脉冲的峰值功率, $\tau = T/T_0$, T_0 为入射脉冲的半宽度。代入(1)得

* 国家自然科学基金资助项目。

$$i \frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} - \gamma P_0 \exp(-2\alpha Z) |U|^2 U \quad (3)$$

(3) 式右边第一项代表脉冲的群速度色散, 第二项代表考虑光纤损耗后的自相位调制。

在光纤的反常色散区, 若初始入射脉冲为高斯脉冲

$$U(0, T) = \exp\left[-\frac{T^2}{2T_0^2}\right] \quad (4)$$

如果只考虑 SPM 效应或 GVD 效应, 则方程(3)有解析解。只有 SPM 效应的作用, 方程(3)简化为

$$\frac{\partial U}{\partial Z} = i\gamma P_0 \exp(-2\alpha Z) |U|^2 U$$

解此方程得 SPM 导致的啁啾为

$$\delta\omega = \frac{1 - \exp(-2\alpha Z)}{\alpha L_{NL}} \frac{T}{T_0^2} \exp\left[-\frac{T^2}{T_0^2}\right] \quad (5)$$

若只考虑 GVD 效应的作用, 方程(3)简化为

$$i \frac{\partial U}{\partial Z} = \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 U}{\partial T^2}$$

利用傅里叶变换法得上式的通解

$$U(Z, T) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{U}(0, \omega) \exp\left[\frac{i}{2} \beta_2 \omega^2 Z - i\omega T\right] d\omega \quad (6)$$

式中 $\tilde{U}(0, \omega)$ 为入射光场在 $Z = 0$ 处的傅里叶变换。

分别把常规光纤、色散缓变光纤、色散阶变光纤的色散关系代入(6)式, 推导出 GVD 效应导致的啁啾表达式:

(1) 常规光纤, $\beta_2(Z) = \beta_2(0)$

$$\delta\omega = \frac{-\frac{Z}{L_D}}{1 + \left[\frac{Z}{L_D}\right]^2} \frac{T}{T_0^2} \quad (7)$$

(2) 色散缓变光纤, $\beta_2(Z) = \beta_2(0) \exp(-2\alpha Z)$

$$\delta\omega = \frac{-\frac{Z}{L_D} \exp(-2\alpha Z)}{1 + \left[\frac{Z}{L_D}\right]^2 \exp(-4\alpha Z)} \frac{T}{T_0^2} \quad (8)$$

(3) 色散阶变光纤^[4],

$$\beta_2(Z) = \beta_2(0) \exp\left[-2\alpha \frac{(m-0.5)L}{N}\right], \quad \frac{(m-1)L}{N} < Z < \frac{mL}{N}$$

其中 N 为阶数, $1 \leq m \leq N$, L 为光纤总长度

$$\delta\omega = \frac{-\frac{Z}{L_D} \exp\left[-2\alpha \frac{m-0.5}{N} L\right]}{1 + \left[\frac{Z}{L_D}\right]^2 \exp\left[-4\alpha \frac{m-0.5}{N} L\right]} \frac{T}{T_0^2} \quad (9)$$

式中引入了色散长度 $L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2(0)|}$, 非线性长度 $L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0}$ 。

图 1 给出了色散阶变光纤和色散缓变光纤的色散对比图, 色散阶变光纤对应 $L = 100$

km, $N = 10$ 。由图 1 可以看到色散阶变光纤的二阶色散参数以色散缓变光纤的二阶色散参数为中心阶跃式变化, 并当 $N \rightarrow \infty$ 时, 两种光纤的色散曲线重合, 说明色散阶变光纤的色散特性与色散缓变光纤的色散特性相一致, 因而色散阶变光纤是色散缓变光纤的一种理想替代品。

3 数值计算

若脉冲在光纤中传输时, 群速度色散效应(GVD 效应) 和自相位调制效应(SPM 效应) 共同起作用, 这时(3) 式无解析解, 我们利用数值法计算了啁啾。在波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 处, 光纤二阶色散 $\beta_2(0) = -7.65 \text{ ps}^2/\text{km}$, 光纤损耗 $\alpha = 0.05/\text{km}$, 初始脉冲半宽度 $T_0 = 19.56 \text{ ps}$, 设 $L_D = L_{NL}, L = 100 \text{ km}$, 总阶数 $N = 10$, 计算结果如图 2。

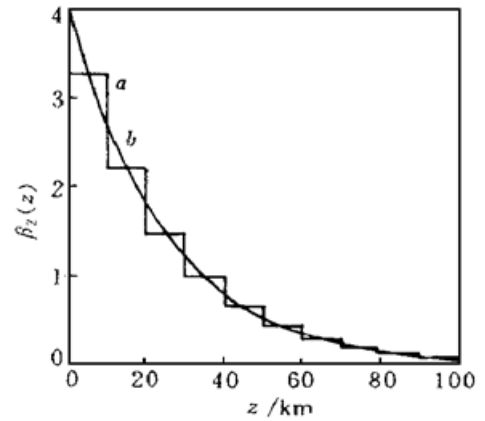


图 1 色散曲线
(a) 色散阶变, (b) 色散缓变

Fig. 1 (a) step-wise decreasing dispersion profile; (b) ideal exponential dispersion profile

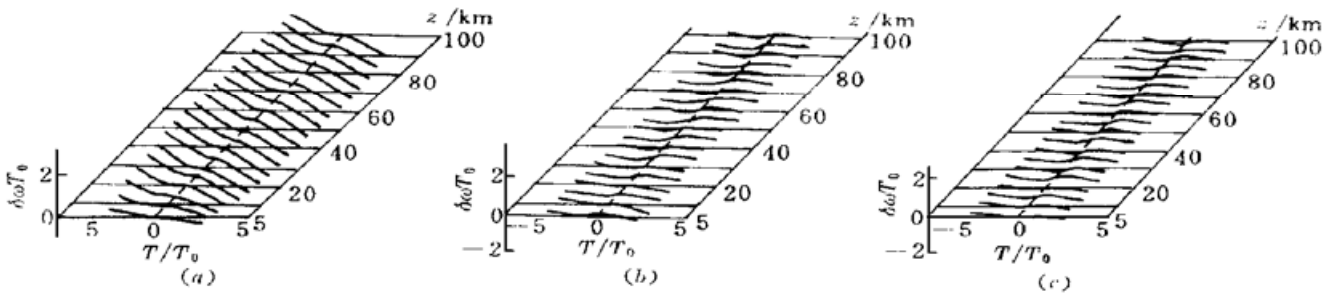


图 2 啁啾演变
(a) 常规光纤; (b) 色散阶变光纤; (c) 色散缓变光纤

Fig. 2 Evolution of chirp of (a) the conventional fiber; (b) the stepwise-decreasing-dispersion fiber and (c) the fiber with slowly decreasing dispersion

比较图 2 (a) ~ (c) 可见, 色散阶变光纤中啁啾随着 Z 跳跃式变化, 且逐渐减小, 在 $Z = 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85, 95 \text{ km}$ 处色散阶变光纤中啁啾与色散缓变光纤中啁啾完全一样。色散阶变光纤中啁啾比常规光纤中啁啾小, 在脉冲中心附近啁啾接近于零, 而在脉冲边缘啁啾等于零。因此, 在色散阶变光纤中 SPM 效应与 GVD 效应基本达到平衡, 能够实现孤子的稳定传输。

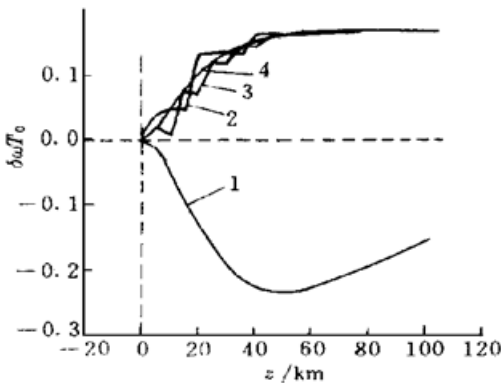


图 3 啁啾随 Z 的变化
Fig. 3 Variation of chirp with Z

为了更深入地比较三种光纤中啁啾的变化, 我们给出了图 3。设 $T/T_0 = 0.8$, 其他参数与图 2 相同。曲线 1 为常规光纤中啁啾; 曲线 2, 3 均为色散阶变光纤中啁啾, 曲线 2 对应 $N = 5$, 曲线 3 对应 $N = 10$; 曲线 4 为色散缓变光纤中的啁啾。从图 3 可清晰看到, 色散阶变光纤中啁啾跳跃式变化, 总阶数 N 越大, 啁啾的跳跃幅度越小, 越

接近于色散缓变光纤中啾啾, 从 $Z = 65 \text{ km}$ 处, 色散阶变光纤中啾啾与色散缓变光纤中啾啾开始重合, 且啾啾等于常数。

综上所述, 虽然色散阶变光纤中啾啾在光纤初端跳跃式变化, 但是, 随着脉冲的传输啾啾趋于色散缓变光纤中啾啾。由此可见, 色散阶变光纤明显优于常规光纤, 且可与色散缓变光纤媲美, 故在光子通信系统中色散阶变光纤完全可以替代色散缓变光纤, 这对实际应用具有指导意义。

参 考 文 献

- 1 K. Tamura, C. R. Doerr, L. E. Nelson *et al.*. Technique for obtaining high-energy ultrashort pulses from an additive-pulse mode-locked erbium-doped fiber ring laser. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(1): 46~ 48
- 2 A. Hasegawa. Numerical study of optical soliton transmission amplified periodically by the stimulated Raman process. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(19): 3302~ 3309
- 3 K. Tajima. Compensation of soliton broadening in nonlinear optical fiber with loss. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(1): 54~ 56
- 4 Yijiang Chen. Black solitons in dispersion-managed fiber transmission systems. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(3): 157~ 159
- 5 A. Hasegawa, S. Kumar, Y. Kodama. Reduction of collision-induced time jitters in dispersion-managed soliton transmission systems. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(1): 39~ 41
- 6 W. Forysiak, F. M. Knox, N. J. Doran. Average soliton propagation in periodically amplified systems with stepwise dispersion-profiled fiber. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3): 174~ 176

Studies on Evolution of Chirp in the Stepwise-decreasing-dispersion

Miao Hongli¹ Wang Jing¹ Liu Xiumin² Feng Lu² Feng Qiyuan²

¹*Department of Physics, Inner Mongolia Normal University, Huhehaote 010022*
²*Department of Physics, Inner Mongolia University, Huhehaote 010021*

Abstract An analytic expression is obtained for the chirp induced by the dispersion in the stepwise-decreasing-dispersion fiber. Using numerical method, we simulate the evolution of chirp in the stepwise-decreasing-dispersion fiber. The results show that the chirp in the stepwise-decreasing-dispersion fiber varies jumply taking the chirp in the fiber of slowly decreasing dispersion as the centre at the beginning, then the chirps coincide gradually with each other. However the chirp in the stepwise-decreasing-dispersion fiber is smaller than the chirp in the conventional fiber.

Key words the stepwise-decreasing-dispersion fiber, chirp, evolution