

色散缓变光纤中不同群色散剖面下的啁啾

王珍丽 王晶 任志君 王进

(中国海洋大学物理系, 青岛 266071)

摘要 从啁啾的角度讨论了不同群色散剖面函数对色散缓变光纤的意义. 发现指数型色散缓变光纤中初始啁啾对 GVD 所致啁啾的影响最小, 在指数型、线型、对数型和 Gaussian 型色散缓变光纤中 GVD 所致啁啾具有同非线性效应所致啁啾相似的饱和性, 二者相消, 使净啁啾趋于零. 在孤子通信系统中, 指数型色散缓变光纤最具实际应用价值.

关键词 啁啾; 色散缓变光纤 (DDF); 群色散剖面; 群速度色散 (GVD)

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A

0 引言

从啁啾的角度讲, 在单模光纤中光孤子是净啁啾为零时的产物, 即孤子是群速度色散 GVD 效应与非线性效应相互抵制至平衡的结果. 然而在普通单模光纤中, 孤子传输的条件并不容易实现, 这是由于光纤损耗的存在往往会减小非线性效应所致啁啾, 而初始啁啾的存在又可能增大 GVD 所致啁啾, 从而使得群速度色散效应大于非线性效应, 这就导致脉冲的传输幅度越来越小, 其脉宽同时被逐渐展宽.

为了使群速度色散效应与非线性效应平衡, 人们研制出了色散缓变光纤. 在色散缓变光纤中, 群速度色散参量将不再是常量, 而将是传输距离的以某种形式出现的减函数. 这样, 虽然脉冲的传输幅度仍会逐渐减小, 但脉冲的展宽却有可能被有效抑制^[1]. 那么, 只要在中继站将孤子信号放大, 长距离、高速率的高质量光孤子通信就可以实现了. 因此, 对色散缓变光纤的研究具有非常重要的现实意义.

而由于特殊的工程需要和工艺的不同, 色散缓变光纤可有多种群色散剖面结构^[2,3]. 本文从啁啾的角度出发讨论不同群色散剖面函数对色散缓变光纤的意义.

1 理论推导

只考虑 GVD 的作用时, 光脉冲在普通单模光纤中传输时满足^[4]

$$i \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} \quad (1)$$

对色散缓变光纤, $\beta_2(z) = \beta_2(0)p(z)$, 其中 $\beta_2(0)$ 为常数, $p(z)$ 为群色散剖面函数. 则

$$i \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{2} \beta_2(0)p(z) \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} \quad (2)$$

利用傅里叶变换, $U(z, T)$ 转换为 $U'(z, \omega)$, 则方程(1)化为

$$i \frac{\partial U'}{\partial z} = -\frac{1}{2} \beta_2(0)p(z) \omega^2 U' \quad (3)$$

令

$$g(z) = \int_0^z \beta_2(0)p(z) dz = \beta_2(0) \int_0^z p(z) dz = \beta_2(0)h(z) \quad (4)$$

则得方程(2)的解为

$$U'(z, \omega) = U'(0, \omega) \exp\left(-\frac{i}{2}g(z)\omega^2\right) \quad (5)$$

从而

$$U(z, T) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} U'(0, \omega) \exp\left[-\frac{i}{2}g(z)\omega^2 - i\omega T\right] d\omega \quad (6)$$

也即

$$U(z, T) = \frac{T_0^2}{T_0^2 - ig(z)} \exp\left[-\frac{T^2}{2(T_0^2 - ig(z))}\right] \quad (7)$$

因此

$$\Delta\nu = \frac{2\text{sgn}(\beta_2(0))(h(z)/L_D) T}{1 + (h(z)/L_D)^2} \frac{T}{T_0^2} \quad (8)$$

再考虑初始啁啾的影响^[5], 设初始啁啾参量为 C , 则在反常色散区, 得

$$\Delta\nu = 2 \frac{C - (1 + C^2)(h(z)/L_D) T}{(1 - Ch(z)/L_D)^2 + (h(z)/L_D)^2} \frac{T}{T_0^2} \quad (9)$$

根据式(7), GVD 所致啁啾是时间 T 的线性函数, 且其大小直接受到群色散剖面函数的积分函数 $h(z)$ 的影响. 常规单模光纤可视为其群色散剖面函数为常数型的特殊色散缓变光纤, 则

$$p(z) = \frac{1}{\beta} \quad (10a)$$

$$h(z) = \frac{z}{\beta} \quad (10b)$$

式中, L 为光纤长度, β 为某一常量. 而当群色散剖

面函数取如下线性形式时

$$p(z) = \frac{1-\beta}{\beta L}z + 1 \tag{11a}$$

对应

$$h(z) = \frac{1-\beta}{2\beta L}z^2 + z \tag{11b}$$

当群色散剖面函数取如下指数形式时

$$p(z) = \exp\left(-\frac{z}{L}\ln\beta\right) \tag{12a}$$

对应

$$h(z) = \frac{L}{\ln\beta}\left[1 - \exp\left(-\frac{z}{L}\ln\beta\right)\right] \tag{12b}$$

当群色散剖面函数取如下高斯形式时

$$p(z) = \exp\left(-\frac{z^2}{L^2}\ln\beta\right) \tag{13a}$$

对应

$$h(z) = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L^2\pi}{\ln\beta}}\operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{\ln\beta}{L^2}}z\right) \tag{13b}$$

当群色散剖面函数取如下对数形式时

$$p(z) = \ln\left(e + \frac{z}{L}(e^{1/\beta} - e)\right) \tag{14a}$$

对应

$$h(z) = \frac{L}{e^{1/\beta} - e}\left[e + \frac{z}{L}(e^{1/\beta} - e)\right] \cdot \ln\left(e + \frac{z}{L}(e^{1/\beta} - e)\right) + \frac{eL}{e - e^{1/\beta}} - z \tag{14b}$$

而当群色散剖面函数取如下双曲线形式时

$$p(z) = \frac{L}{(\beta - 1)z + L} \tag{15a}$$

对应

$$h(z) = \frac{L}{\beta - 1}\ln\left(\frac{\beta - 1}{L}z + 1\right) \tag{15b}$$

2 讨论与分析

将以上所得项代入式(9),则得到各情形下相应的表达式. 根据式(9),高斯脉冲在各型色散缓变光纤内传输时,GVD所致啁啾是时间 T 的线性函数,因此可取 $T = 0.25T_0$,即从脉冲后沿某点对其加以考察. 并且各参量在图 1 中取值如下:光纤长度 $L = 20$ km, $\beta_2(0) = -20$ ps²/km, $\beta = 54.6448$, 光纤损耗 $\alpha = 0.25$ dB/km, $L_D = L_N = 5$ km, 初始脉宽 $T_0 = 10$ ps.

同时初始啁啾的影响也不容忽视. 这是因为在光纤的反常色散区,在较短的脉冲传输距离以内,初始啁啾的正负往往会决定 GVD 所致啁啾的性质,从效果看,初始正啁啾将导致脉冲的初始窄化,而初始负啁啾则相反. 这可以从图 1 得到验证. 在图 1 中,当初始啁啾 $C = -0.25$ 时,各型光纤中 GVD 所致啁啾均为负值;而当 $C = 0.25$,在各型光纤的末端,GVD 所致啁啾都为正值. 并且,当 $C = 0.25$,常规单模光纤中,在长达 20 km 的传输距离上,GVD 所致啁啾值一直与初始啁啾保持同号;对双曲线型色散缓变光纤,传输距离约为 10 km 以内时,上述情形也会出现;而对其他四种类型,上述情形只在 1 ~ 2 km 的传输距离以内才会出现. 不仅如此,这四种光纤中,脉冲传输到一定距离后, $C = \pm 0.25$ 时分别得到的 GVD 所致啁啾值之间的差别变得很小,甚至在指数型当中,当 $z \geq 15$ km 时,这种差别已不复存在. 众所周知,初始啁啾对光脉冲无畸传输往往是有害的,这样的啁啾特性则表明,指数型、线型、高斯型和对数型色散缓变光纤,具有弱化初始啁啾对光脉冲传输不良影响的性能.

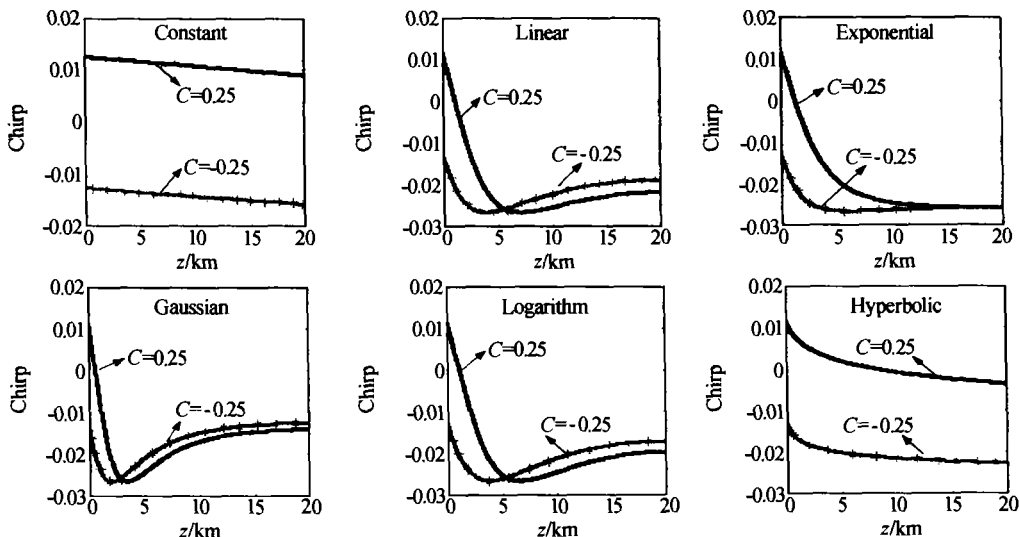


图 1 各型色散缓变光纤中 GVD 所致啁啾与传输距离的关系

Fig. 1 Variation of chirp caused by GVD with distance for different types of dispersion-decreasing fibers

在上述四种光纤中, GVD 所致啁啾随着传输距离变化的总趋势为随着 z 的增大而逐渐减小, 且具有饱和性. 值得指出的是, 这种饱和性, 也为光纤中由非线性效应所致啁啾^[6] 所拥有, 不仅如此, 在本文所设定的条件下, 很长的传输距离上这两者符号一直相反而绝对值大致相等. 因此, 只要各参数相匹配, GVD 效应就可以与非线性效应相抵消, 孤子的无畸传播能力也就得到了提升. 图 2 表现了初始啁啾参数为 0.4 时, 指数型、线型和和高斯型色散缓变光纤在脉冲后沿由 GVD 效应与非线性效应共同作用所得净啁啾与传输距离的关系图. 由图 2 可知, 群色散剖面函数为指数型时, 净啁啾变化最为平缓, 且正负值分布接近均衡, 这样脉冲虽然在短距离内会有初始窄化, 但随后的逐渐展宽会使脉冲趋于原状. 从而在相同的条件下, 光脉冲在指数型色散缓变光纤传输至中继处产生的畸变必将是最小的. 线型、对数型和高斯型中, 净啁啾值变化幅度较大, 且达到负极值后不断正向增长, 甚至在高斯型中 $z = 20$ km 时的净啁啾增长到可以和初始净啁啾相比的程度. 光脉冲畸变自然就会随之变大. 至于在双曲线型和常数型中, GVD 所致啁啾不仅强烈受到初始啁啾的影响, 而且它们也没有表现出和非线性效应所致啁啾相似的饱和性, 这就使得 GVD 效应无法同步抵制非线性效应.

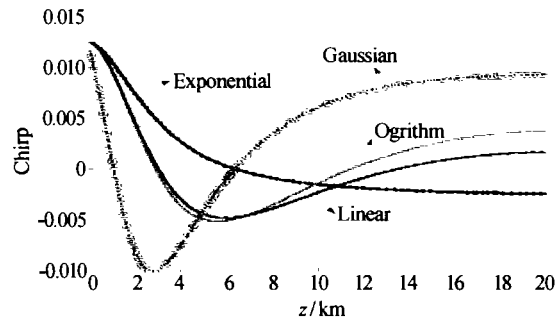


图 2 加上非线性效应后脉冲后沿在线型、指数型与高斯型色散缓变光纤中分别产生的总啁啾

Fig. 2 Sum chirp in the exponential, linear, Logarithm and Gaussian type of dispersion-decreasing fibers. Both nonlinear effect and GVD effect are considered

为进一步详细分析指数型、线型和和高斯型色散缓变光纤的传输性能, 我们取参数 $C = 1, \alpha = 0.4$, 利用 MATLAB 数值计算了净啁啾在这三种光纤中的演变, 如图 3 所示. 显然, 高斯型中的净啁啾需经过最长的距离才能稳定在零附近, 直接导致脉冲压缩; 而指数型中的净啁啾与线型中的大体相近, 但正如图 3(d) 中所表现的线型与指数型中净啁啾之差, 线型中的净啁啾值在脉冲后沿较大, 而在脉冲前沿较小, 因此倾向于把脉冲压缩. 而色散缓变光纤的主要任务是保持脉冲原形, 既不展宽也不能压缩, 这样指数型色散缓变光纤就成为了最佳, 线型次之, 对数型、高斯型再次之.

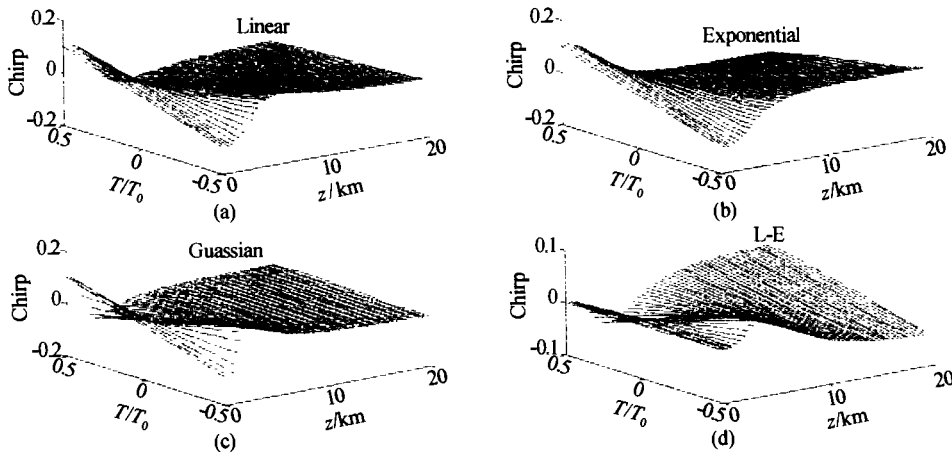


图 3 净啁啾在线型、指数型和高斯型色散缓变光纤中的演变

Fig. 3 Evolution of sum chirp in the linear, exponential and Gaussian type of Dispersion-decreasing fibers.

The fourth subfigure is the comparison between linear and exponential type

3 结论

色散缓变光纤中 GVD 所致啁啾是时间的线型函数, 并受到脉冲初始啁啾的影响. 并且初始啁啾的影响在指数型色散缓变光纤中最弱, 在线型、对数型和高斯型中大致相同, 在常规单模光纤中最大, 在双曲线型中也比较大.

GVD 所致啁啾因群色散剖面类型的不同而随传输距离具有不同的变化趋势. 当群色散剖面函数

为指数型、线型、对数型和高斯型时, GVD 所致啁啾具有饱和性, 并大致可抵消非线性效应所致啁啾.

又发现对长距离、高速率孤子通信系统, 在考虑了非线性效应的作用后, 各种类型的色散缓变光纤中, 指数型的能最大程度地保持脉冲原形, 线型、对数型和高斯型的则趋于较小程度上的压缩脉冲, 效果次之. 双曲线型比常规光纤(常数型)性能略有改善, 却也几乎不能同步抵制非线性效应, 导致传送

的脉冲信号质量不高. 因此指数型色散缓变光纤最具现实意义. 这从啁啾角度说明了文献[7]中关于指数型色散缓变光纤最适于孤子系统的结论是正确的.

参考文献

- 1 Tajima K. Compensation of soliton broadening in nonlinear optical fibers with loss. *Opt Lett*, 1987, **12**(1): 54
- 2 Lima J L S, Sombra A S B. Soliton and quasi-soliton swithing in nonlinear optical loop mirrorconstructed from dispersion-decreasing fiber. *Optics Communication*, 1999, **163**: 292 ~ 300
- 3 Silva M G da, Nobrega K Z, Sombra A S B. Analysis of soliton swithing in dispersion-decreasing fiber couplers. *Optics Communication*, 1999, **171**: 351 ~ 364
- 4 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press, New York, 1989. 61 ~ 64
- 5 王晶, 王珍丽. 初始啁啾参数对偏振模耦合产生啁啾的影响. *激光技术*, 2003, **27**(4): 371 ~ 374
Wang J, Wang Z L. *Laser Technology*, 2003, **27**(4): 371 ~ 374
- 6 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press, New York, 1989. 86
- 7 任志君, 王晶, 杨爱玲, 等. 不同群色散剖面的色散缓变光纤中交叉相位调制不稳定性的分析. *光电子激光*(待发)
Ren Z J, Wang J, Yang A L. *Journal of Optoelectronics & Laser*(to be published)

Chirp in Dispersion-decreasing Fibers of Different Dispersion-decreasing Profiles

Wang Zhenli, Wang Jing, Ren Zhijun, Wang Jin

Department of Physics, Ocean University of China, Qingdao 266071

Received date: 2003-04-07

Abstract From the aspect of chirp, six types of dispersion-decreasing profiles' (DDP) effects on dispersion-decreasing fiber(DDF) are discussed. It's found that the GVD-caused chirp in the exponential type of DDF is least likely to be affected by the initial chirp, the GVD-caused chirp in exponential, linear, Logarithm and Guassian types of DDF has the synchronous character of saturation as the nonlinear-effect-caused chirp, and the two kinds of chirp are found to counteract to balance, which makes the sum chirp tend to be zero. The conclusion is obtained as that the type of exponential is of the most practical value for soliton communications system.

Keywords Chirp; DDF; DDP; GVD

Wang Zhenli female, born in 1978, in Qingdao, studying in the Ocean University of China for Master Degree. Study subject is optical fibers soliton communications system.

