

文章编号: 1001-3806(2005)03-0315-03

预啾啾对偏复用孤子技术的补偿

王润轩

(宝鸡文理学院 物理系, 宝鸡 721007)

摘要: 在导出自相位调制和交叉相位调制共同作用所致相位调制频率啾啾的基础上, 数值研究了相位调制频率啾啾与初始啾啾的关系, 并对有和无初始啾啾 40Gbit/s 归零码 (RZ) 在二阶和三阶色散完全补偿 (路径平均色散为 0) 的色散管理偏复用孤子传输系统中的传输效果进行计算。结果表明, 在输入功率达到一定值时, 初始啾啾参量 C 对相位调制频率啾啾的作用, 决定着系统偏复用孤子技术的成效及传输性能, 适当选取初始啾啾参量 C 能够有效抑制偏振模色散, 提高孤子脉冲稳定传输距离。

关键词: 偏复用孤子; 传输性能; 色散管理; 偏振模色散; 初始啾啾; 补偿

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A

The compensation of pre-chirped on polarization-divided multiplexing soliton technique

WANG Run-xuan

(Department of Physics, Baoji College of Arts and Science, Baoji 721007, China)

Abstract After deriving self phase modulation (SPM) and cross phase modulation (XPM), under the joint effect of phase modulation frequency chirp (PMC), the relationship between PMC and initial chirp is numerically studied the transmission effects of dispersion managed soliton (DMS) in the transmission system are calculated when there is initial chirp 40Gbit/s return to zero (RZ) or not. The second-order and third-order dispersion is completely compensated (the average dispersion being zero). The result indicates that when the input power is fixed, the effect of initial chirp C on PMC determines the effect and transmission performance of polarization-divided multiplexing soliton technique in the system and that choosing properly the value C can effectively restrain polarization modes dispersion (PMD) and lengthen the distance of stability transmission of soliton pulse.

Key words polarization-divided multiplexing soliton transmission function; dispersion managed (DM); polarization modes dispersion (PMD); initial chirp compensation

引 言

随着人类社会信息传输量的日益增加, 对通信系统的传输速率要求越来越高。当单信道传输速率达到 40Gbit/s 时, 在低速率传输中原本被忽略的偏振模色散 (polarization mode dispersion, PMD) 效应已成为直接影响系统传输性能的主要因素之一^[1-3]。由于 PMD 效应的随机性, 难以用确定的方法予以补偿, 被认为是限制光纤传输速率的最终因素, 由此也成为研究的热点之一^[4-6]。最近提出的减小和消除 PMD 的方案中^[7-14], 偏复用孤子 (polarization-divided soliton

PDS) 技术特色独具: 两列具有相同比特率、偏振方向正交的孤子序列耦合进入强双折射光纤, 利用光纤的非线性效应 (即交叉相位调制效应 XPM), 使孤子脉冲在两偏振主轴上的分量在传输时相互吸引而达到共同的速度, 形成自捕获现象, 从而消除两偏振轴脉冲传输的时延差——PMD, 使两脉冲序列在光纤中互不走离的稳定传输, 实现单信道传输速率不变情况下的通信容量成倍增加。采用对称分步傅里叶方法, 数值分析了初始啾啾对 40Gbit/s 归零码 (RZ) 在二阶和三阶色散完全补偿 (路径平均色散为 0) 的色散管理 (DM) 传输系统偏复用孤子技术的补偿作用。

1 系统模型与计算方法

如果考虑光纤损耗、色散 (二阶和三阶色散和 PMD) 和非线性效应, 光脉冲在双折射光纤中的耦合非线性薛定谔方程为:

$$\frac{\partial A_x}{\partial z} + \beta_{1x} \frac{\partial A_x}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2x} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} + \frac{1}{6} \beta_{3x}(z) \frac{\partial^3 A_x}{\partial t^3} +$$

基金项目: 陕西省教育厅基金资助项目 (02K194-0203011)

作者简介: 王润轩 (1953-), 男, 副教授, 现从事物理教学和非线性全光通信研究。

E-mail: wangrunxuan2001@eyou.com

收稿日期: 2004-01-12 收到修改稿日期: 2004-04-05

$$\frac{\alpha_x}{2} A_x = i \left[|A_x|^2 + \frac{2}{3} |A_y|^2 \right] A_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_y}{\partial z} + \beta_{ly} \frac{\partial A_y}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_{2y} \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} + \frac{1}{6} \beta_{3y}(z) \frac{\partial^3 A_y}{\partial t^3} +$$

$$\frac{\alpha_y}{2} A_y = i \left[|A_y|^2 + \frac{2}{3} |A_x|^2 \right] A_y \quad (2)$$

式中, A_j 表示轴偏振分量脉冲包络, $\beta_{1j}, \beta_{2j}, \beta_{3j}(j=x, y)$ 表示不同偏振方向的一阶、二阶、三阶色散参数。 α, γ 分别为光纤的损耗系数和非线性系数, 两个正交偏振方向的 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \alpha, \gamma$ 取相同值, z 和 t 分别为传输距离和时间。方程右边第 1 项为 SPM 项, 第 2 项为 PMD 项。作变换: $A_j = \sqrt{P_0} \exp(-\alpha z/2) u_j(x, y)$, $\bar{\beta} = (\beta_{lx} + \beta_{ly})/2$, $t = (T - z\beta_1)/T_0$, $L_{2d} = T_0/|\beta_2|$, $L_{3d} = T_0^3/|\beta_3|$, $\delta_1 = (\beta_{lx} - \beta_{ly})/2T_0L = \Delta\beta T_0L/2$, $\delta_2 = \text{sgn}(\beta_2)L/L_{2d}$, $\delta_3 = \frac{1}{6} \text{sgn}(\beta_3)L/L_{3d}$ 。 T_0 为入纤脉冲 $1/e$ 处脉冲半宽度, L 为光纤链的放大周期, L_{2d}, L_{3d} 分别为二阶、三阶色散长度, $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 分别为归一化双折射参量、归一化二阶及三阶色散参量。(1) 式和 (2) 式变为:

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \delta_1 \frac{\partial u}{\partial T} + \frac{i}{2} \delta_2 \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} - \delta_3 \frac{\partial^3 u}{\partial T^3} = iLP_0 e^{-\alpha z} \left[|u|^2 + \frac{2}{3} |v|^2 \right] u \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} + \delta_1 \frac{\partial v}{\partial T} + \frac{i}{2} \delta_2 \frac{\partial^2 v}{\partial T^2} - \delta_3 \frac{\partial^3 v}{\partial T^3} = iLP_0 e^{-\alpha z} \left[|v|^2 + \frac{2}{3} |u|^2 \right] v \quad (4)$$

由于 PMD 的随机性, 所以, 把长距离的光纤看作是由许多小段的光纤联结而成, 每小段光纤长度为 z_0 (文中取 $z_0 = 0.2 \text{ km}$), 折射率差 Δn 相同, 光脉冲在每小段中传输满足 (3) 式和 (4) 式, 而在两小段结合处双折射的方向是随机变化的, 不受相邻及其它部分的影响, 两个正交偏振方向之间产生随机轴的旋转和附加位相差。设轴的旋转角度为 θ 位相差为 φ , 则 θ 和 φ 均匀的分布在 $[0, 2\pi]$ 之间。光脉冲在两段光纤结合处的一侧传到另一侧符合传输矩阵:

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta e^{i\varphi} \\ -\sin\theta e^{-i\varphi} & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, u, v 为入射正角偏振分量归一化振幅; u', v' 为出射正角偏振分量归一化振幅。按上述模型, 色散偏振

$$\text{参量 } D_p = \sqrt{\frac{8}{3\pi}} \frac{\Delta n}{C} \sqrt{z_0} = \frac{\Delta\beta}{\sqrt{z_0}} \quad \Delta\beta = \sqrt{\frac{8}{3\pi}} \frac{\Delta n}{C} z_0$$

图 1 为数值计算所采用的 40Gbit/s 预啁啾归零码 (CRZ) 传输的零平均色散管理传输系统示意图。

图 1 示出的零路径色散管理孤子传输系统中, 每一个光纤链都是由 3 段非零色散的位移光纤 Z-DSF 联

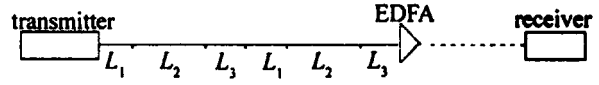


Fig 1 Schematic diagram of 40Gbit/s CRZ zero-path averaged dispersion transmission system

结而成, 每一个光纤链的色度色散都被完全补偿, 即 $\beta_2 = 0, \beta_3 = 0$ 系统的色散补偿周期 $L_c = L_1 + L_2 + L_3 = 20 \text{ km}$, $L_1 = 5 \text{ km}$, $\beta_2 = 0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = 0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$; $L_2 = 10 \text{ km}$, $\beta_2 = -0.5 \text{ ps}^2/\text{km}$, $\beta_3 = -0.1 \text{ ps}^3/\text{km}$; $L_3 = 5 \text{ km}$, 其色散参量与 L_1 参量相同; 系统的放大周期为色散补偿周期的 2 倍, 亦即 $L = 2L_c = 40 \text{ km}$; 脉冲中心波长在 $1.55 \mu\text{m}$ 处光纤的损耗系数和非线性系数分别为 $\alpha = 0.22 \text{ dB/km}$ 及 $\gamma = 1.27 \text{ W}^{-1}/\text{km}$ 。受调制的孤子发生器发出带有初始啁啾的高斯型脉冲序列, 沿光纤两偏振轴输入耦合脉冲序列中单个脉冲光场若用式表示:

$$\begin{cases} u_x(0, T) = \sqrt{P_0} \cos^2\theta \exp\left[-\frac{1+iC}{2} \frac{T^2}{T_0^2}\right] \\ u_y(0, T) = \sqrt{P_0} \sin^2\theta \exp\left[-\frac{1+iC}{2} \frac{T^2}{T_0^2}\right] \end{cases} \quad (6)$$

式中, C 为初始啁啾参量, P_0 为输入功率, θ 为输入偏振角, 对高斯型脉冲, 其半峰全宽 $T_{\text{FWHM}} = 1.665T_0$ 。计算时取 $T_0 = 1 \text{ ps}$ 。脉冲序列由 64 位 RZ 组成, RZ 的占空比取 1/2。掺铒光纤放大器的增益为定值, 恰好等于链路损耗。接收机模型由一个带宽 160 GHz 的光滤波器, 一个平方检测的光电探头和一个带宽 35 GHz 的二阶巴特沃斯电滤波器组成。传输质量采用 Q 值法, 当 $Q < 9$ 时, 系统误码率为, 脉冲传输最远距离。由于 (2) 式无解析解, 只能用数值方法计算。对 (3) 式、(4) 式采用对称分步傅里叶方法进行数值计算。

2 初始啁啾参量对传输系统偏振复用孤子技术的补偿作用

2.1 初始啁啾参量 C 与相位调制频率啁啾 $\Delta\omega$ 的关系

光脉冲在零路径色散管理 (光纤链路中色度色散被完全补偿) 传输系统中的非线性源自于自相位调制 (SPM) 和 XPM 的共同作用, 其共同作用等效于可由 (2) 式导出的 SPM 和 XPM 共同作用所致的频率啁啾:

$$\Delta\omega_x = 2\gamma P_0 \frac{z}{T_0} \cos^2\theta \exp\left[-\frac{T^2}{T_0^2}\right] + \frac{\sin^2\theta}{6\delta_2 z} T_0^2 L \times \left[\exp\left[-\left(\frac{T}{T_0} - \frac{2z\delta_1}{T_0^2 L}\right)^2\right] - \exp\left[-\frac{T^2}{T_0^2}\right] \right] \quad (7)$$

$$\Delta\omega_y = 2\gamma P_0 \frac{z}{T_0} \sin^2\theta \exp\left[-\frac{T^2}{T_0^2}\right] + \frac{\cos^2\theta}{6\delta_2 z} T_0^2 L \times \left[\exp\left[-\left(\frac{T}{T_0} - \frac{2z\delta_1}{T_0^2 L}\right)^2\right] - \exp\left[-\frac{T^2}{T_0^2}\right] \right] \quad (8)$$

初始啾啾参量 C 对 SPM 和 XPM 共同作用所致的相位调制频率啾啾的调制, 决定着系统偏振复用孤子技术的成效及传输性能。由于初始啾啾参量 C 与相位调制频率啾啾的关系极其复杂, 图 2 示出的是相位调制频率啾啾 $\Delta\omega$ 与初始啾啾参量 C 关系的数值平均结果。计算中取 $\delta_1 = 0.2, z = L = 40\text{km}, \theta = \pi/4$ 初始啾啾参量 C 分别取 $\pm 1, \pm 0.2, 0$ (计算中其它参量不变, 相应不同初始啾啾参量 C 对 P_0 取 $0 \sim 8\text{dBm}$, 每隔 0.5 个单位进行 15 次计算取平均值)。由图 2 可知, 初始啾啾参量 C 越大, 相位调制频率啾啾 $\Delta\omega$ 的值就越大; 当 C 较小时, 在脉冲中心附近, 相位调制频率啾啾才占支配地位, 由此可见, 初始啾啾参量是决定相位调制频率啾啾大小的主要因素。

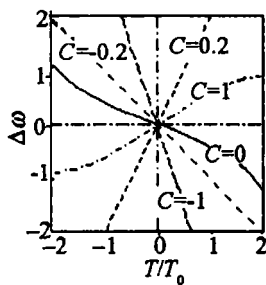


Fig 2 The relationships between $\Delta\omega$ and initial chirp and T/T_0

阶色散完全补偿 (路径平均色散为 0) 的色散管理孤子 (DM S) 传输系统偏振复用孤子技术的补偿, 的确可以提高系统的传输性能。

图 4 中的 3 条曲线分别相应入射脉冲平均功率为 $0\text{dBm}, 4\text{dBm}, 8\text{dBm}$ 的情况。由图可以看出, 每种情况都对应着一个初始啾啾参量的最佳值, 且该值随入射功率的不同而变化。依据入射功率选择合适的初始啾啾参量能使传输距离大幅提升。图 4 中, 当脉冲平均功率为 4dBm 时, 在 $C = 3$ 处有初始啾啾脉冲传输距离近乎是无初始啾啾脉冲的 2 倍。但应注意到, 初始啾啾也不可太大, 不然会增大脉冲的相互作用, 而降低系统的传输性能。

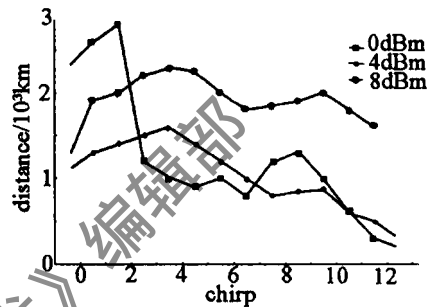


Fig 4 The maximum transmission distance as a function of pulse chirp

2.2 初始啾啾参量 C 对偏振复用孤子传输系统性能的影响

在二阶和三阶色散完全补偿 (路径平均色散为 0) 的色散管理偏振复用孤子传输系统中, 由于色度色散被完全补偿, 在输入功率达到一定值时 ($0 \sim 8\text{dBm}$), 脉冲在传输过程中积累了较多的非线性效应, 遂成为影响系统传输性能的主要因素。预啾啾技术的根本目的就在于脉冲输入传输光纤后以更快的速度散开, 从而降低非线性效应的影响, 以利于非线性效应与双折射效应的平衡。利用光纤的非线性效应抵消双折射效应的实质就是相位调制频率啾啾对偏振模色散的抑制。图 3 示出的 40Gbit/s 归零码 (RZ) 在二阶和三阶色散完全补偿 (路径平均色散为 0) 的色散管理偏振复用

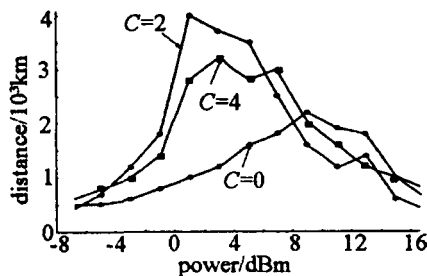


Fig 3 Transmission distance versus average input power under dispersion slope compensation

孤子传输系统的传输距离与初始啾啾的关系。由此可见, 使用初始啾啾对 40Gbit/s 归零码 (RZ) 在二阶和三

3 结论

通过对有和无初始啾啾 40Gbit/s 归零码 (RZ) 在二阶和三阶色散完全补偿 (路径平均色散为 0) 的色散管理偏振复用孤子传输系统中的传输效果进行计算分析表明: 在输入功率达到一定值时, 初始啾啾参量 C 对相位调制频率啾啾的作用, 决定着系统偏振复用孤子技术的成效及传输性能; 选择合适的初始啾啾参量能够有效抑制偏振模色散使传输距离大幅提升。

参考文献

- [1] SUNNERUD H, KARLSSON M, ANDREKSON P A Analytical theory for PMD-compensation [J]. IEEE Photon Technol Lett 2000, 12(1): 50~51
- [2] XIE C, KARLSSON M, ANDREKSON P A *et al*. Robustness of dispersion managed solitons to the polarization mode dispersion in optical fibers [J]. IEEE Photon Technol Lett 2001, 13(2): 121~123
- [3] 贾东方, 李世忱, 宋立军. 光纤拉曼放大器的优化设计问题 [J]. 光学学报, 2001, 21(7): 808~810
- [4] MATSUMOTO M, AKAGI Y, HASEGAWA A Propagation of soliton in fibers with randomly varying birefringence effects [J]. Selected Topics in Quantum Electron, 2000, 6(6): 1161~1168
- [5] 刘秀敏, 张晓光, 林宁 *et al* 用同步调制方法降低偏振模色散影响的理论研究 [J]. 光子学报, 2000, 29(8): 722~725
- [6] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics [M]. New York: Academic Press, 1995: 258~263.
- [7] 徐坤, 谢世坤. 高速光纤通信中偏振模色散及补偿技术 [J]. 半导体光电, 2000, 21(1): 1~5.

的平滑效应也增加。另外,由湍流理论知道,不相同的湍流将对通过它们传输的光束引入不同的随机相位,对于通过相同厚度大气层传输的两束相干度相同的光束而言,因经过湍流外尺度小的湍流层传输的光束通过不同湍流的频次高于经过湍流外尺度大的湍流层传输的光束,所以其相干度要低,湍流外尺度的不同将导致传输光束的相干度不同,随着光束相干度的降低,湍流外尺度导致的相干度进一步降低,效应也将降低。

3 结 论

通过采用包含湍流内、外尺度因子的调制折射谱和窄带宽波场交叉谱密度函数的互相干函数近似,导出了弱大气湍流起伏环境下高斯-谢尔光束闪烁孔径平滑因子的解析理论关系。得出孔径对高斯-谢尔光束的大气闪烁平滑作用随着湍流外尺度的减小而减小、湍流外尺度对不相干光闪烁孔径平滑作用的影响可以忽略的结论。文中所得结论与部分相干(高斯-谢尔)光的光通信质量高于相干光束的其它理论与实验研究结论是相一致的^[4~7]。

参 考 文 献

- [1] 张逸新. 随机介质中光的传播与成像 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 200~369
- [2] WU J. Propagation of a Gaussian Shell beam through turbulent media [J]. *J Mod Opt* 1990, 37: 671~678.
- [3] WU J, BOARDMAN A D. Coherence length of a Gaussian Shell beam and atmospheric turbulence [J]. *J Mod Opt* 1991, 38: 1355~1363
- [4] GBUR G, WOLF E. Spreading of partially coherent beams in random media [J]. *J O S A*, 2002, A19: 1592~1598.
- [5] DOGARU A, AMARANDE S. Propagation of partially coherent beams: turbulence induced degradation [J]. *Opt Lett* 2003, 28: 10~12
- [6] SHIRAIT, DOGARU A, WOLF E. Mode analysis of spreading of partially coherent beams propagating through atmospheric turbulence [J]. *J O S A*, 2003, A20: 1094~1102
- [7] RECKLIN J C, DAVIDSON F M. Atmospheric optical communication with a Gaussian Shell beam [J]. *J O S A*, 2003, A20: 856~866
- [8] RECKLIN J C, DAVIDSON F M. Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: implications for free-space laser communication [J]. *J O S A*, 2002, A19: 1794~1801
- [9] COULMAN C E, VEMIN J, COQUEUGNIOT Y *et al*. Outer scale of turbulence appropriate to modeling refractive index structure profiles [J]. *Appl Opt* 1988, 27: 155~160
- [10] 张逸新, 孙 寅. 湍流尺度对大气成像系统分辨率的影响 [J]. *中国激光*, 2000, 27(7): 655~659
- [11] LUTOMIRSKIR F, YURA H T. Propagation of a finite optical beam in an inhomogeneous medium [J]. *Appl Opt* 1971, 10: 1652~1658
- [12] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. *Laser beam propagation through random media* [M]. Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1998. 113~117
- [13] LAWRENCE R S, STROHBEHN J W. A survey of clear air propagation effects relevant to optical communications [J]. *Proc IEEE* 1970, 58: 1523~1545.
- [14] 张逸新, 陶纯堪. 湍流大气中传输光波的波相位结构解析函数 [J]. *激光技术*, 2004, 28(4): 337~340
- [8] CAMMERON J, CHEN L, BAO X Y. Impact of chromatic dispersion on the system limitation due to polarization mode dispersion [J]. *IEEE Photon Techno Lett* 2000, 12(7): 47~49
- [9] FOOLE C D, WANG R A. Phenomenological approach to polarization dispersion in long single fibers [J]. *Electron Lett* 1986, 22(19): 1029~1030.
- [10] 周志强, 唐余亮, 谢崇进. 色散补偿光纤传输系统最佳补偿方案 [J]. *激光技术*, 2000, 24(5): 265~268.
- [11] 林 宁, 杨伯君, 张晓光 *et al*. 脉冲初始啁啾对色散管理孤子传输性能的影响 [J]. *光电子·激光*, 2001, 12(2): 185~188
- [12] 王 岚, 赵文玉, 王宏祥 *et al*. 高速光纤通信中抑制偏振模色散的新机制 [J]. *光学学报*, 2003, 23(6): 689~693
- [13] 徐 铭, 杨祥林, 刘学明 *et al*. 色散控制孤子系统偏振模色散的滤波控制 [J]. *电子学报*, 2003, 31(8): 1193~1196.
- [14] 王 晶, 苗洪利, 郑荣儿 *et al*. 归零码与非归零码传输系统模拟 [J]. *光电子·激光*, 2002, 13(8): 814~817

(上接第 317 页)