

采用色散搭配技术的孤子传输实验*

余建军^{1,2} 杨伯君² 管克俭¹

(¹北京邮电大学无线电工程系, ²基础科学部 北京 100088)

提要 采用色散搭配技术进行了 1 Gbit/s, 52.68 km 的孤子传输实验, 实验表明采用色散搭配技术传输孤子时存在着合理地组合光纤的问题, 相同的组合即使入纤方向改变, 孤子传输的稳定性以及为了实现一阶孤子传输所需要的能量也是不同的, 采用合理的色散搭配技术有利于孤子的稳定传输。

关键词 光孤子传输, 色散位移光纤, 色散搭配技术

1 引 言

孤子色散搭配技术引起了人们的广泛兴趣^[1-7]。它有许多优点: 孤子传输只需要光纤平均色散处于反常色散或零色散区^[1-3], 就可降低对色散位移光纤质量的要求; 采用适当的色散搭配技术能够延长孤子的放大距离和传输距离; 具有比单一色散光纤更大的功率容限等优点^[2,5]。M. Nakazawa 等人利用日本东京都的光缆用色散搭配技术成功地进行长距离的孤子传输^[8]。本文报道采用孤子色散搭配技术进行的 1 Gbit/s, 52.68 km 的孤子传输实验。

2 实 验

孤子传输实验装置如图 1 所示。我们采用正常色散光纤消啁啾^[9,10]。实验系统中所用激光器为增益开关分布反馈式半导体激光器 (GS-DFB-LD), 阈值电流为 25 mA, 当调制电信号重复频率为 1 GHz 时, 谱宽为 0.38 nm 光脉冲中心波长为 1.552 μm 光脉冲形状为双曲正割型。光谱仪的最小精细度为 0.1 nm 光放大器 1 为采用两个 1480 nm 大功率半导体激光器作泵浦的掺铒光纤放大器, 小信号增益大于 30 dB, 饱和输出平均光功率为 9 dBm, 噪声系数小于 6 dB 为了减小光脉冲自相关曲线的测量误差, 采用放大器 2 放大信号, 该放大器结构与放大器 1 结构基本相同, 但该放大器输出功率较小, 饱和输出功率为 3 dBm, 小信号增益为 30 dB 强度自相关测量装置由迈克尔逊干涉仪、倍频晶体、滤光片、光电倍增管和 X-Y 记录仪构成。倍频晶体为 LiNbO₃ 晶体。我们研制的强度自相关仪精度为 ± 0.1 ps 采用示波器测量脉冲重复频率, 频谱仪测量光脉冲谱宽, 自相关仪测量超短光脉冲脉宽。用 4.5 km 的正常色散光纤消啁啾后脉冲的宽度为 10 ps, 谱宽为 0.28 nm, 经过计算可知脉冲剩余啁啾为 -0.5 实验所用的色散位移光纤 (DSF) 参数如下: 色散位移光纤由 9 段构成, 光纤长度 (L) 和色散参量 (D)

* 邮电部重点资助项目和国家 863 科技重点资助项目。

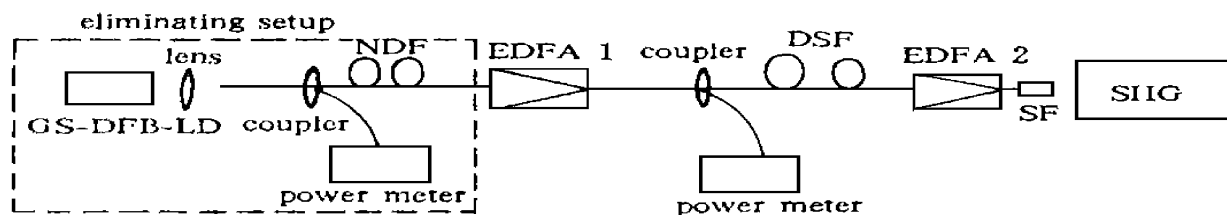


图 1 实验装置图

NDF 正常色散光纤; DSF 色散位移光纤;

GS-DFB-LD 增益开关分布反馈式半导体激光器; EDFA 掺铒光纤放大器; SFB 自聚焦棒

lens 透镜; coupler 耦合器; power meter 功率计; SHG 自相关仪

Fig. 1 The schematic diagram of the experimental setup

NDF normal dispersion fiber; DSF dispersion shifted fiber;

GS-DFB-LD gain switching distributed feedback laser diodes; EDFA erbium doped fiber amplifier; SFB self-focus bar

分别为 (1) $L_1 = 2.43$ km, $D_1 = 1.1$ ps/nm/km; (2) $L_2 = 11.1$ km, $D_2 = 1.03$ ps/nm/km; (3) $L_3 = 2.3$ km, $D_3 = 1.0$ ps/nm/km; (4) $L_4 = 2.4$ km, $D_4 = 1.0$ ps/nm/km; (5) $L_5 = 7.9$ km, $D_5 = 1.0$ ps/nm/km; (6) $L_6 = 11.1$ km, $D_6 = 0.99$ ps/nm/km; (7) $L_7 = 2.35$ km, $D_7 = 0.92$ ps/nm/km; (8) $L_8 = 11.1$ km, $D_8 = -0.14$ ps/nm/km; (9) $L_9 = 2.0$ km, $D_9 = -3.3$ ps/nm/km 光纤总长度为 52.68 km, 平均色散为 0.6 ps/nm/km. 有效面积均为 $50\mu\text{m}^2$, 非线性系数均为 $n_2 = 3.2 \times 10^{-20}$ m²/W 考虑光纤接头损耗, 光纤平均损耗为 0.26 dB/km 所有光耦合器均为 1:9

3 实验结果及讨论

为了实现孤子稳定, 长距离传输, 必须对这 9 段光纤进行合理的搭配, 经过数值模拟分析发现光纤色散沿光脉冲传输方向从最大到最小, 从反常色散到正常色散搭配^[8], 即光纤按照 (1)→(2)→(3)→(4)→(5)→(6)→(7)→(8)→(9) 搭配最有利于孤子的稳定传输, 我们称这种搭配方式为方式 1 如果光脉冲按照沿方式 1 的反方向传输, 即按 (9)→(8)→(7)→(6)→(5)→(4)→(3)→(2)→(1) 传输, 我们称之为方式 2 将光脉冲在单一色散光纤 (色散参量为 0.6 ps/nm/km, 色散参量等于方式 1 和方式 2 的平均色散参量值) 传输的方式称为方式 3, 图 2 所示为在方式 1 中实现一阶孤子传输时孤子脉冲宽度与色散位移光纤长度的关系, 可以看到实验结果与理论结果基本一致 为了比较方便我们也对采用方式 2 的搭配光纤进行了实验研究, 图 3 中曲线 B 给出了采用方式 2 实现一阶孤子传输时孤子脉冲宽度与色散位移光纤长度的关系, 此时为了实现一阶孤子传输需要的入纤光平均功率为 0.57 mW, 曲线 A 为采用方式 1 进行一阶孤子传输的实验结果, 此时为了实现一阶孤子传输需要的入纤平均功率为 0.455 mW, 曲线 C 为采用单一色散光纤 (色散参量为 0.6 ps/nm/km) 实现一阶孤子传输的数值模拟结果, 此时为了实现一阶孤子传输所需要的平均入纤功率为 0.41 mW 可以看到孤子在方式 1 中传输最稳定, 在方式 2 中传输最不稳定 可见采用合适的搭配技术有利于孤子的稳定传输, 如果搭配不当将不利于孤子传输 采用色散搭配技术进行孤子传输时提高了入纤光脉冲的峰值功率, 这与文献 [2] 的数值模拟结果相一致 图 4 给出了在不同的入纤光功率下经过 52.68 km 传输后测得的自相关曲线 图 4(a) 为入纤平均功率为 0.2 mW 时, 测量得到的自相关曲线 此时脉宽为 14.6 ps, 由于此时入纤功率不足以形成孤子的能量, 所以脉冲展宽 图 4(b) 为

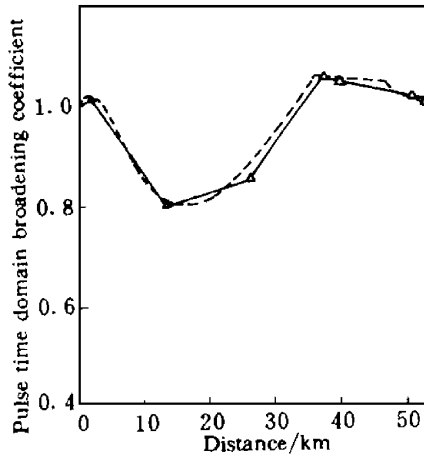


图 2 实现一阶孤子传输时, 孤子脉冲时域展宽系数与色散位移光纤长度的关系 (实线为实验测得结果, 虚线为数值模拟结果)

Fig. 2 The relationship between the pulse broadening coefficient in the time domain and the fiber length. The solid curve represents the experimental results, and the dashed curve represents the numerical results

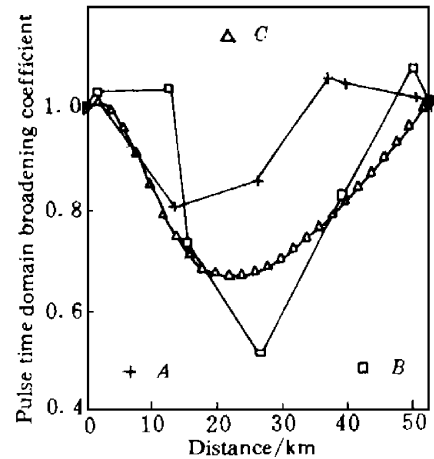


图 3 实现一阶孤子传输时, 孤子脉冲时域展宽系数与色散位移光纤长度的关系。曲线 A 代表在方式 1 中的实验结果, 曲线 B 代表在方式 2 中的实验结果, 曲线 C 代表在方式 3 中的数值结果

Fig. 3 The relationship between the pulse broadening coefficient in the time domain and the fiber length, curve A represents the experimental result in mode 1, curve B represents the experimental results in mode 2, and curve C represents the numerical results in mode 3

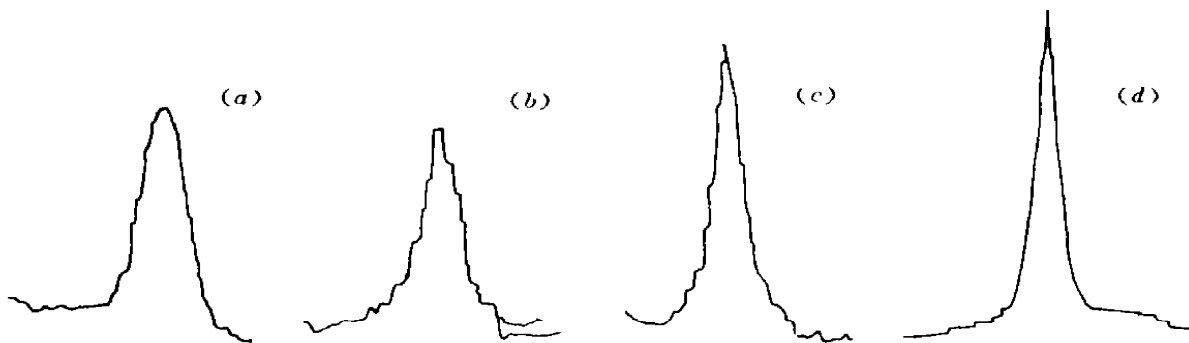


图 4 (a) 入纤平均功率为 0.2 mW 时的自相关曲线, 脉宽为 14.6 ps; (b) 入纤平均功率为 0.47 mW 时的自相关曲线, 脉宽为 10 ps; (c) 入纤平均功率为 0.7 mW 时的自相关曲线, 脉宽为 7.4 ps; (d) 入纤平均功率为 1 mW 时的自相关曲线, 脉宽为 6.4 ps

Fig. 4 (a) The auto-correlation trace with the mean input power= 0.2 mW, and the pulse width= 14.6 ps; (b) The auto-correlation trace with the input mean power= 0.45 mW, and the pulse width= 10 ps; (c) The auto-correlation trace with the input mean power= 0.7 mW, and the pulse width= 7.4 ps; (d) The auto-correlation trace with the input mean power= 1 mW, and the pulse width= 6.4 ps

入纤平均功率为 0.47 mW 时测量得到的自相关曲线, 此时脉宽为 10 ps, 脉宽等于初始光脉冲宽度, 可见实现了一阶孤子传输。我们发现为了实现一阶孤子传输, 实验所需要的能量大于理论值, 理论值为 0.455 mW, 这主要是由于采用的光纤每段长度比较短, 光纤接头较多, 接头损耗较大, 而且有个别光纤的有效面积不同。而我们计算时考虑的光纤损耗为平均值且所有的光纤的有效面积相同, 考虑到这些因素和测量仪表的误差我们认为这些差异是可以接受的。图 4(c), (d) 分别为入纤平均功率为 0.7 mW 和 1 mW 时测量得到的自相关曲线, 此时脉宽

分别为 7.4 ps 和 6.4 ps, 小于初始光脉冲宽度, 可见实现了高阶孤子传输。入纤平均功率为 0.47 mW, 0.7 mW 和 1.0 mW 分别相当于不考虑光纤损耗和光脉冲的初始啁啾以及光纤色散为单一色散 0.6 ps/nm/km 的 2.1 阶, 2.8 阶和 3.0 阶孤子能量, 我们可以看到光脉冲具有初始啁啾在有损以及色散不均匀的光纤中传输时要实现孤子传输所需要的能量较大。也可看到入纤功率越大光脉冲越窄, 这与单一色散光纤中入纤功率和脉冲之间的关系基本一致。

4 结 论

采用合理的色散搭配技术进行了 1 Gbit/s, 52.68 km 的光孤子传输实验, 实验结果表明采用色散搭配技术进行孤子传输时孤子传输更稳定, 为了实现一阶孤子传输将需要较同参量的单一色散光纤更大的入纤能量。

致谢 感谢邮电部武汉邮电研究院和清华大学提供了部分实验设备。实验过程中得到了张晓光副教授, 杨启敏同学的帮助, 特此致谢。

参 考 文 献

- 1 M. Nakazawa, H. Kubota. Optical soliton communication in a positively and negatively dispersion-allocated optical fibre transmission line. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(3): 216~ 217
- 2 N. J. Smith, F. M. Knox, N. J. Doran *et al.*. Enhanced power solitons in optical fibres with periodic dispersion management. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(1): 54~ 55
- 3 M. Nakazawa, H. Kubota, K. Tamura. Nonlinear pulse transmission through an optical fibre at zero-average group velocity dispersion. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(3): 452~ 454
- 4 S. Kawanishi, H. Takara, O. Kamatani *et al.*. 100 Gbit/s, 560 km optical transmission experiment with 80 km amplifier spacing employing dispersion management. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(5): 470~ 471
- 5 M. Nakazawa, H. Kubota, A. Sahara *et al.*. Marked increase in the power margin through the use of a dispersion-allocated soliton. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(8): 1088~ 1090
- 6 Knox F. M., Forsysiak W., Doran. N. J. 10-Gbit/s soliton communication systems over standard fiber at 1.55 μ m, and the use dispersion compensation. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **LT-13**(10): 1955 ~ 1962
- 7 M. Suzuki, I. Morita, S. Yamamoto *et al.*. Timing jitter reduction by periodic dispersion compensation in soliton transmission. in PDP 20, OFC 95, OSA, IEEE, San Diego, CA, Mar. 1995
- 8 M. Nakazawa, Y. Kimura, K. Suzuki *et al.*. Soliton transmission at 20 Gbit/s over 2000 km in Tokyo metropolitan optical network. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(16): 1478~ 1479
- 9 Yu Jianjun, Zhang Xiaoguang, Yang Bojun *et al.*. Characteristics of negative chirp pulse transmission along single mode fiber. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(10): 1423~ 1428 (in Chinese)
- 10 Yu Jianjun, Yang Qimin, Yang Bojun *et al.*. The theoretical and experimental research on using normal dispersion fiber to eliminate chirp. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, **B6**(1): 21~ 28

A Soliton Transmission System with Dispersion-allocated Technology

Yu Jianjun^{1,2} Yang Bojun² Guan Kejian¹

(¹The Department of Radio Engineering, ²The Basic Science Department, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088)

Abstract 1 Gbit/s, 52.68 km soliton transmission was achieved by employing dispersion-allocated technology. The experiment showed that dispersion-allocated soliton technology was favorable to stable soliton transmission. Even if the direction of the input optical pulse was exchanged, the soliton stability and the energy to maintain the fundamental-soliton were different. A proper allocation favors stable

soliton transmission.

Key words soliton transmission, dispersion-allocated technology, dispersion shifted fiber

一种可用于光学准直的新型波带片

在现代光学技术中,波带片已应用于准直、分束、互连和编码等多种领域。普通波带片的衍射斑中心是一较大的亮点,用于激光准直时,其准直精度不高。J. Ojeda-Castaneda等人^[1]提出一种焦点处光强为零的振幅型波带片,利用焦点处的暗点实现高精度准直。但焦点位置调节不方便,稍偏离焦点,暗点即消失。而对于一准直系统,要求有大范围的焦深,因此这种波带片在实际应用中有很大的局限性。我们提出一种新型波带片,它由偶数个圆心角相等的分片组成,每相邻的分片有 α 的位相差且每相邻的环带也有 α 的位相差,我们称之为位相型零轴辐射波带片。这种元件能将入射的平行光转变为光轴上任意点强度为零的光场分布,且稍微偏离中心处,理论上光强为无穷大。利用此性质,该元件可实现高精度准直并克服了振幅型波带片的局限性。

一光学系统的三维复振幅点扩展函数可表示为^[2]

$$p(r, h, z) = \int_0^{2\alpha} \int_0^{\infty} t(p, \theta) e^{i2\pi[r-d\cos(\theta-h) - \lambda z d^2/2]} dd d\theta \quad (1)$$

其中, r 和 h 分别表示探测面上的径向坐标和角度坐标, d 和 θ 分别表示出瞳面上的径向坐标和角度坐标, z 表示高斯像离焦度的大小, $t(d, \theta)$ 为光瞳函数。于是轴上强度分布可写为

$$I(0, 0, z) = |p(r=0, h=0, z)|^2 = \left| 2\int_0^{2\alpha} (2\pi)^{-1} \int_0^{\infty} [t(d, \theta) d\theta] \times \exp(-i\alpha z d^2) dd \right|^2 \quad (2)$$

对于零轴位相型波带片,其光瞳函数对角度 θ 的平均值为零。即满足

$$(2\alpha)^{-1} \int_0^{2\alpha} t(d, \theta) d\theta = 0 \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式,即有

$$I(0, 0, z) = 0 \quad (4)$$

从上式可看出,强度 I 的变化与 z 无关,即对于零轴位相型波带片,在轴上任一点处均能接收到具有中心暗点的衍射斑。

忽略常位相因子,菲涅耳衍射可看成是衍射屏上光振动的复振幅分布与二次位相因子乘积的傅里叶变换。采用快速傅里叶变换算法,可快速模拟零轴位相型波带片的菲涅耳衍射过程。模拟过程中参数设置如下:

采样点数 $N = 230$,入射光波长 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$,环带数 $m = 20$,最外层环带半径 $r_{20} = \sqrt{20 \times 500} \mu\text{m}$

波带片的制作及实验过程如下,首先用PCL打印控制语言编程控制HP激光打印机输出波带片图形,然后将图形照相缩版,经曝光、显影、定影,将图形转移到全息干版上,得到振幅型的波带片。在显影过程中,我们采用的是能获得高反差效果的D8显影液,定影液为F5。此时可采用He-Cd激光曝光将图形转移到涂有光致抗蚀剂的石英基片上,再采用等离子体刻蚀的方法可得到有严格 α 位相延迟的位相型零轴波带片。为简单起见,实验中采用的是将振幅型的波带片通过漂白的办法获得折射率调制的位相型零轴波带片。所用的漂白剂为铁氰化钾。经多次反复实验,严格控制漂白时间,可近似得到 α 位相延迟的位相型零轴波带片,其直径约1 cm

实验中采用面阵CCD记录波带片衍射花样,数据送入计算机处理。衍射花样图形以bmp文件格式存放。

模拟结果和实验结果表明,计算机模拟结果与实验结果相一致。波带片在不同位置均能产生中央为一暗点的衍射斑。具有 N 个分片的零轴位相型波带片的Fresnel衍射花样中心为一暗点,有 N 条暗线相交于中心暗点,暗线数与分片数相等,暗线的取向与分片边界的取向一致。

参 考 文 献

- 1 J. Ojeda-Castaneda, G. Ramirez. Zone plates for zero axial irradiance. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(2): 87~ 89
- 2 B. R. Frieden. Optical transfer of the three-dimensional object. *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, **57**(1): 56~ 66

四川 大学物理系 粟敬钦 郭永康 韦 辉 张怡霄 成都 610064

1997-08-04收稿; 1997-10-27收到修改稿