

# 光孤子传输和误码测量的实验系统\*

余建军<sup>1,2</sup> 杨伯君<sup>1</sup> 于丽<sup>1</sup> 李朝晖<sup>1</sup> 张晓光<sup>1</sup> 管克俭<sup>2</sup>

(北京邮电大学<sup>1</sup>基础科学部;<sup>2</sup>电信工程学院 北京 100876)

**提要** 进行了孤子通信的误码测量,成功地将 2.5 Gbit/s 的孤子传输了 52 km,通过了 2 h 的测量无误码。对实验中的关键技术——超短光脉冲产生、高速外调制器、电信号和光信号的放大、光孤子脉冲序列与调制信号的同步以及正负色散位移光纤搭配技术进行了介绍和分析,对实验中的现象进行了理论分析。

**关键词** 光孤子通信,误码测量,超短光脉冲,外调制

## 1 引言

光孤子通信无论在国内还是在国外都引起人们的极大兴趣,从最近的文献<sup>[1~4]</sup>便可以看到这一点。国内有很多科研单位进行了孤子通信的理论和实验研究<sup>[3,4]</sup>,但至今在国内还没有关于孤子误码测量的报道。其主要原因是孤子误码测量不同于非归零码(NRZ)的误码测量,孤子误码测量要难于 NRZ 脉冲的误码测量。对于高速 NRZ 脉冲的误码测量只需要采用连续光加外调制便能产生 NRZ 信号脉冲。但是对于光孤子的误码测量必须先产生孤子脉冲序列,然后对孤子脉冲序列采用外调制才能产生信号脉冲。得到接近变换极限的超短光脉冲序列和脉冲序列与调制信号同步的问题都比较难以解决,这也是孤子通信难于实用的一个原因。但是孤子通信适合超长距离传输,这对于通信无疑具有很大的诱惑力。如果不进行外调制产生随机信号脉冲,这样的系统只能称为孤子传输系统,不能称为孤子通信系统,国内过去进行的孤子传输实验都只是传输孤子序列。

## 2 实验中的关键技术

### 2.1 超短光脉冲源

由于采用外调制不能直接产生接近变换极限的超短光脉冲,为了实现孤子传输,必需产生变换极限的光脉冲。产生超短光脉冲的办法一般有以下两种:增益开关法<sup>[5,6]</sup>,光纤环法<sup>[7]</sup>。利用光纤环激光器能直接得到接近变换极限的超短光脉冲,但是稳定性能不好<sup>[7]</sup>。利用半导体激光器(DFB-LD)增益开关法产生超短光脉冲是产生皮秒级光脉冲的一种有效方法<sup>[5,6]</sup>,但是产生的光脉冲具有较大的红移啁啾,这种啁啾将恶化系统性能。本系统采用法布里-珀罗腔(F-P)

\* 原邮电部重点资助项目。

收稿日期: 1998-03-18; 收到修改稿日期: 1998-05-18

消啁啾<sup>[5]</sup>。经过消啁啾后信号平均能量为-18 dBm 左右。超短光脉冲最大半宽度为 22 ps(自相关曲线最大半宽度为 31 ps), 频谱宽度为 0.12 nm, 时间带宽积为 0.328, 接近于变换极限。

## 2.2 高速外调制器

本实验系统采用 M-Z 型 Ti:LiNbO<sub>3</sub> 强度调制器调制信号。实验中所用的调制器的半波电压为 7 V, 调制器 3 dB 带宽为 4 GHz, 插入损耗为 10 dB。此调制器 3 dB 带宽为 3.9455 GHz。关于调制器的特性在文献[8]中有较详细的分析。

## 2.3 信号放大

信号放大包括电信号和光信号的放大。由于 DFB-LD 和调制器都需要较大的微波驱动信号, 而从误码仪输出的时钟信号和数字信号都很小, 因此有必要对微波电信号进行放大。在我们的实验中采用了两个微波功率放大器, 其中一个微波功率放大器为窄带放大器, 中心频率为 2.488 GHz, 带宽为 2 MHz, 用于误码仪产生的时钟信号的放大, 放大后的时钟信号用作 DFB-LD 的微波驱动源。另一个为宽带放大器, 带宽为 0.01~4 GHz, 用作调制器微波信号的放大。本系统中采用了三个掺铒光纤放大器(EDFA)用于光信号放大。EDFA1, EDFA2, EDFA3 的饱和输出平均功率分别为 10 dBm, 16 dBm 和 18 dBm。EDFA 的其他参数见文献[7]。

## 2.4 光孤子脉冲序列与调制信号的同步

调节微波信号源的输出功率, 选择适当的微波传输线使 DFB-LD 产生的光脉冲到达调制器时与加在调制器上的微波信号同步。图 1(a) 和(b) 分别给出了在不同直流偏置下, 用取样示波器测量得到的超短光脉冲经过...1111...码调制后得到的输出光脉冲曲线, 可以看到当直流偏置为 3 V 时, 脉冲有较好的形状和较大的幅度, 而当直流偏置为 5 V 时, 输出脉冲的幅度较小。图 2 对在不同的直流偏置、同步以及不同步情况下得到的结果进行了解释, 可以看到当失步或者直流偏置不合适时都会引起脉冲的畸变。

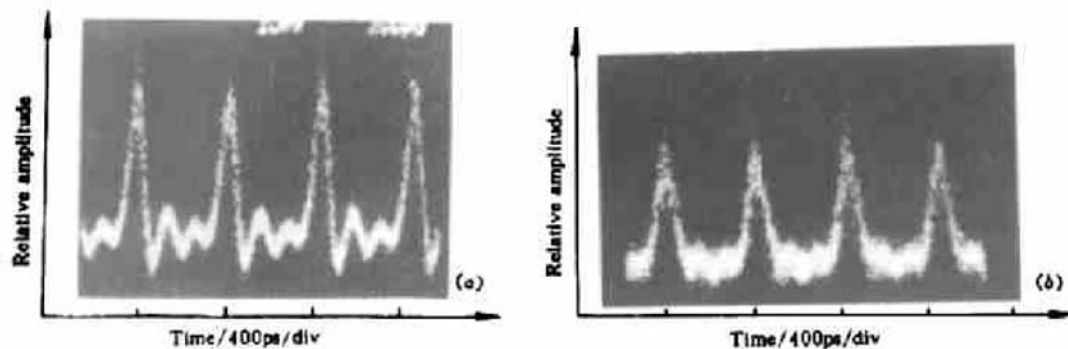


图 1 在不同直流偏置下, 经过调制后用示波器测量得到的输出光脉冲曲线

(a) 直流偏压为 3 V; (b) 直流偏压为 5 V

Fig. 1 The trace shows optical pulses after modulation by the LiNbO<sub>3</sub> measured by a sampling oscilloscope with different DC bias voltages

(a) DC bias=3 V; (b) DC bias=5 V

## 2.5 正负色散位移光纤搭配技术

由于实验中的光纤色散不一致, 而且还有一段正常色散位移光纤, 因此有必要对这些光纤进行合理的搭配<sup>[2,4]</sup>。实验所采用的色散位移光纤由以下 7 段构成: 光纤长度  $L$  和色散参量  $D$  分别为: 1)  $L_1 = 11.7$  km,  $D_1 = 1.52$  ps/nm/km; 2)  $L_2 = 11.1$  km,  $D_2 = 1.49$  ps/nm/km; 3)  $L_3 =$

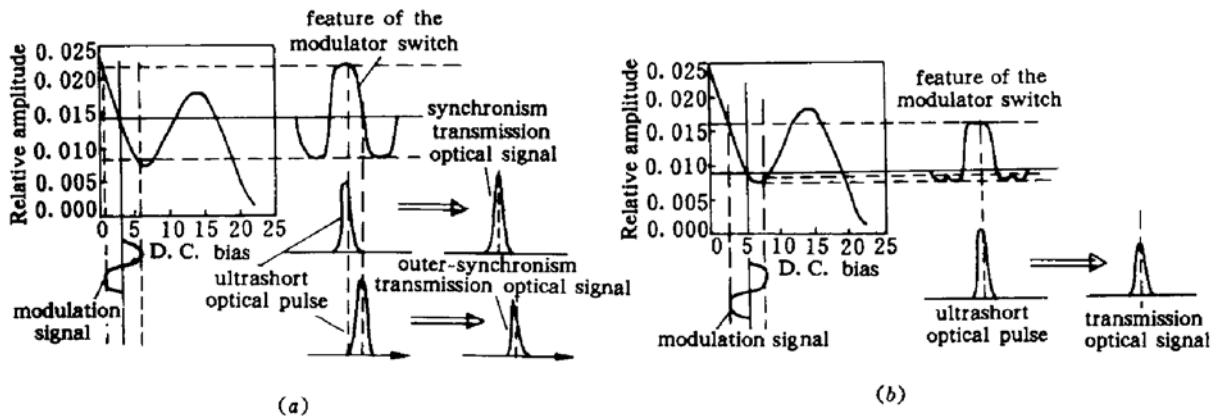


图 2

(a) 直流偏置等于 3 V, 在同步以及不同步情况下的原理图; (b) 直流偏压为 5 V, 在同步情况下的原理图

Fig. 2

(a) The diagram shows the principle of the synchronous and non-synchronous cases with a DC bias=3 V used;

(b) The synchronous case with a DC bias=5 V used

2. 8 km,  $D_3 = 1.52$  ps/nm/km; 4)  $L_4 = 4.3$  km,  $D_4 = 1.52$  ps/nm/km; 5)  $L_5 = 3.7$  km,  $D_5 = 1.49$  ps/nm/km; 6)  $L_6 = 7.9$  km,  $D_6 = 1.4$  ps/nm/km; 7)  $L_7 = 11.2$  km,  $D_7 = -0.2$  ps/nm/km。光纤总长度为 52.7 km, 平均色散为 1.12 ps/nm/km, 光纤有效面积为  $50 \mu\text{m}^2$ , 光纤非线性系数为  $n_2 = 3.2 \times 10^{-20} \text{m}^2/\text{W}$ , 光纤的损耗为 0.26 dB/km。光纤焊接接头损耗平均为 0.05 dB, 活接头平均损耗为 0.8 dB。当脉宽为 20 ps 的光脉冲在色散为 1.12 ps/nm/km 的光纤中传输, 孤子周期为 152 km, 由于存在正常色散光纤, 此时的孤子周期没有很大的意义<sup>[4]</sup>。通过数值模拟发现按照图 3 的方式搭配光纤有益于孤子的稳定传输。

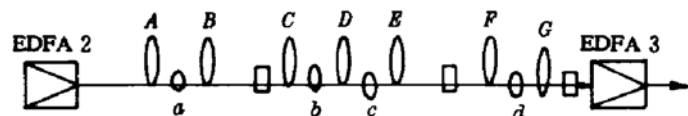


图 3 不同色散位移光纤搭配示意图

A ~ G: 色散位移光纤; a ~ d: 焊接头; □: 活接头

Fig. 3 The diagram of allocation different dispersion shifted fibers

A ~ G: dispersion shifted fiber; a ~ d: fixed connection; □: active connection

### 3 实验装置

实验装置如图 4 所示。实验中的主要测试仪器和器件性能如下: 2.5 Gbit/s SDH 误码测试仪为日本 Anritsu 公司的 ME3620A 型; 取样示波器取样带宽为 20 GHz; SHG 自相关测量仪为本课题组自制<sup>[9]</sup>; 光谱仪最小分辨率为 0.1 nm。高速光电变换器响应波长范围为 1000~1600 nm, 响应时间 < 40 ps。

实验中从 DFB 激光器中的光脉冲经过 F-P 腔消啁啾后, 能量为 -18 dBm 左右, 如果直接接调制器, 经过调制器的 10 dB 损耗后, 光脉冲平均功率只有 -28 dBm 左右的能量, 用 EDFA 放大将不能得到较好的性能, 所以在进调制器以前采用 EDFA1 放大能量。由于使用的调制器与偏振有关, 所以在进调制器以前加上一个偏振控制器, 改变偏振方向。经过调制器后采用 EDFA2 放大能量, 以满足孤子传输所需要的能量, 由于此放大器饱和输出较大, 在 EDFA 后面接一可变衰减器, 调节能量, 然后进光纤。经过 52 km 光纤后能量较小采用 EDFA3 放大能量, 经过适当的衰减后进误码仪的输入光端口, 进行误码检测, 或者经过光电变换用示波器观看。

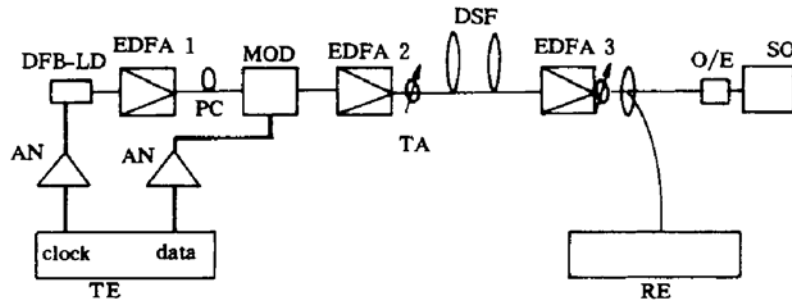


图 4 实验装置图

DSF:色散位移光纤;DFB-LD:分布反馈激光器;EDFA:掺铒光纤放大器;O/E:光电变换器;PC:偏振控制器;MOD:铌酸锂调制器;clock:误码仪时钟信号;data:误码仪数据信号;SO:取样示波器;TA:可调衰减器;TE:误码仪发送端;RE:误码仪接收端;AW:宽带放大器;AN:窄带放大器

—:光信号;——:电信号

Fig. 4 The experimental setup

DSF: dispersion shifted fiber; DFB-LD: distributed feed-back laser diode; EDFA: erbium-doped fiber amplifier; O/E: optical/electrical converter; PC: polarized controller; MOD: LiNbO<sub>3</sub> modulator; clock: clock signal from SDH error analyzer; data: data signal SDH error analyzer; SO: sampling oscilloscope; TA: tunable attenuator; TE: transmitter of SDH error analyzer; RE: receiver of SDH error analyzer; AW: amplifier with wide frequency; AN: amplifier with narrow frequency

—: optical signal; ——: electrical signal

## 4 实验结果

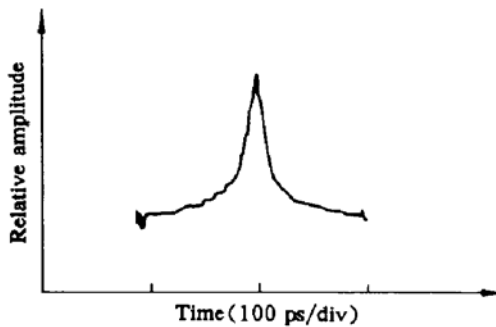


图 5 消啁啾后的脉冲自相关曲线

Fig. 5 The SHG auto-correlator trace of an optical pulse with chirp eliminated

由激光器出来的光脉冲经过消啁啾处理后,脉冲的自相关曲线如图 5 所示,最大半宽度为 22 ps,光谱如图 6 (a) 所示,可见 DFB 激光器中心波长为 1553.6 nm,谱宽为 0.12 nm。此时光脉冲时间带宽积为 0.328,接近变换极限。经过外调制和 52 km 的传输后脉冲的频谱如图 6 (b) 所示,除了 EDFA 的自发辐射(ASE)噪声外,谱宽与传输前相同。

为了实现孤子传输,入纤功率有一定的要求,通过改变 EDFA2 后面的可变衰减器,使入纤功率为实现一阶平均孤子能量的水平,此时的平均功率为 4.1 dBm。由于没有窄带光纤滤波器,

经过光纤放大器后测量到的光功率有误差。

按照以上方式进行了 2 h 的误码测量,码型为  $2^{15}-1$ ,测量结果为无误码。实验发现当改用  $2^{23}-1$  的码型时,系统的误码最小为  $3.2 \times 10^{-6}$ ,无论怎样调整传输系统也不能做到无误码传输,其原因是因为我们所采用的宽带放大器的低频截止波长为 10 MHz,当采用的伪随机码序列增长时,连零个数增多,而宽带放大器对低频无放大这将导致误码增多。

当增大入纤光功率使之远大于一阶孤子形成功率至 8 dBm 时,系统出现误码,而且功率越大误码越多,这主要因为入纤功率太高形成了高阶孤子,导致脉冲变窄,甚至分裂,造成误码

的增加。当减小入纤功率到 $-4$  dBm 左右时系统出现误码,而且入纤功率越小,误码越大,其原因是 EDFA 的 ASE 影响越来越大。经过 52 km 的色散位移光纤后出纤功率与误码率的关系曲线如图 7 所示。

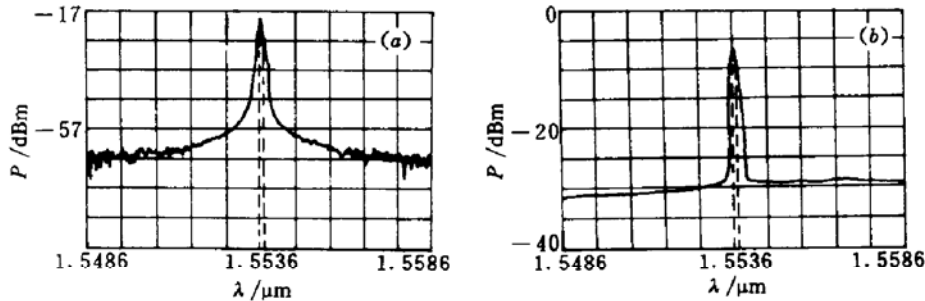


图 6 传输前光脉冲光谱 (a) 和传输后光脉冲光谱 (b)

Fig. 6 (a) Spectrum of an initial optical pulse; (b) spectrum of the optical pulse after transmission over 52 km

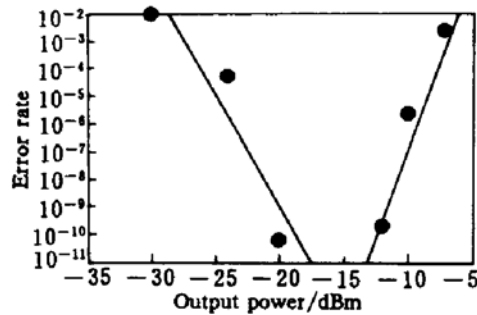


图 7 出纤功率与系统误码率的关系

Fig. 7 The relationship between the mean output power and the error rate

需要说明的是尽管在实验中使用了 3 个 EDFA,但是实验系统中没有使用任何光滤波器,可见 3 个 EDFA 的 ASE 噪声对系统的影响不是很大。

**致谢** 作者感谢武汉邮电科学研究院、清华大学以及国家 863 办公室提供了部分设备。感谢北京大学、北方交通大学、电子部 11 所的有关专家在鉴定过程中的有益建议和对有关问题的探讨。

### 参 考 文 献

- 1 John M. Jacob, E. A. Golovchenko, A. N. Pilipetski *et al.*. 10-Gb/s transmission of NRZ over 10000 km and solitons over 13500 km error-free in the same dispersion-managed system. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, 9 (10)1412~1414
- 2 O. Leclerc, E. Desurvire. Investigation into the robustness of 100 Gbit/s ( $5 \times 20$  Gbit/s) regenerated WDM soliton transoceanic transmission to line breaks and repairs. *Electron. Lett.*, 1997, 33(18):1568~1570
- 3 Yu Jianjun, Yang Qimin, Mu Romei *et al.*. Soliton transmission by normal dispersion fiber to eliminate chirp. *High Tech. Lett.* (高技术通讯), 1997, 7(6):21~23 (in Chinese)
- 4 Jianjun Yu, Bojun Yang, Kejian Guan *et al.*. Dispersion-allocated soliton technology with long amplifier spacing and long distance. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, 9(7):952~954
- 5 Zhong Shan, Lu Caiyun, Wu Jian *et al.*. 5 GHz soliton source. *Acta Electronica Sinica* (电子学报), 1997, 25(8):78~81 (in Chinese)

- 6 Yu Jianjun, Yang Bojun, Guan Kejian. Generation of 5 GHz/s 16.2 ps ultrashort optical pulse. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, 18(1):14~17 (in Chinese)
- 7 Yu Jianjun, Li Chaohui, Yang Bojun *et al.*. Optical fiber ring laser with tunable wavelength and repetitive frequency. *Chinese J. Lasers*, to be published
- 8 Eric A. Seanson, Stephen R. Chinn. 40 GHz pulse train generation using soliton compression of a Mach-Zehnder modulator output. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, 7(1):114~116
- 9 Yu Jianjun, Zhang Xiaoguang, Yang Bojun. The consideration for crystal by utilizing the second harmonic to detect soliton pulse. *Study on Optical Communications* (光通信研究), 1996, (1):14~18 (in Chinese)

## The Experimental System for Soliton Transmission and Error-rate Measurement

Yu Jianjun<sup>1,2</sup> Yang Bojun<sup>1</sup> Yu Li<sup>1</sup> Li Zhaohui<sup>1</sup> Zhang Xiaoguang<sup>1</sup> Guan Kejian<sup>2</sup>

[<sup>1</sup>The Department of Basic Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876]  
<sup>2</sup>The School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts and  
Telecommunications, Beijing 100876]

**Abstract** The error measurement for soliton communication is successfully realized. For 2.5 Gbit/s solitons transmitted over 52 km, there is no error within two hours. The key techniques—the generation of ultra-short optical pulses, external modulator with high speed, amplification for electrical and optical signals, the synchronization for soliton pulses and modulation signal and dispersion allocation for normal and abnormal dispersion fibers are introduced and analyzed. The experimental phenomena are theoretically analyzed.

**Key words** optical soliton communication, error measurement, ultra-short optical pulse, external modulation