

全光非线性光孤子通信系统技术*

钟卫平

(广东省惠州市电信局 惠州 516000)

摘要 近年来光孤子通信技术发展很快,各种新方案不断提出,各种系统设计与试验系统技术取得了重大突破,使光孤子通信向实用化迈进了一大步.文章综述了光孤子通信技术的最新进展,分析了光孤子通信技术的发展趋势.

关键词 光孤子通信,掺铒光纤放大器,光孤子控制技术

SYSTEM TECHNOLOGY FOR ALL-OPTICAL NONLINEAR SOLITON COMMUNICATION

Zhong Weiping

(Bureau of Huizhou Telecommunication, Huizhou 516000)

Abstract The technology for optical soliton telecommunication has been fast development in recent years, and various new schemes are constantly being put forward. Important breakthroughs have been made in system design and experimented techniques, resulting in a great advance towards the practical realization of optical soliton telecommunication. The latest progress and future developments are reviewed.

Key words optical soliton communication, erbium-doped fiber amplifier (EDFA), soliton control technology

1 引言

目前的线性光纤通信系统,由于受损耗与色散以及沿路光电子中继设备电子响应速度的限制,系统的传输速率较低,且中继距离较短.当传输速率提高到 10 Gb/s 以上数量级时,中继设备的价格愈益高昂,这对于通信系统传输的光纤化形成了一大障碍.解决以上问题的有效办法,就是采用全光线路通信系统.这种系统可以用光放大器来代替光电子中继器,在光信号传输过程中,以光放大来补偿能量,并对光信号进行整形,以恢复与保持脉冲形状,这种系统的造价成本大为降低.光孤子通信就是这样一种全光线路系统.光纤中强度引起的折射率非线性自相位调制(SPM)效应(光学克尔效应),

在反常色散区导致的光脉冲压缩可以抵消群速度色散(GVD)效应所形成的光脉冲展宽,从而保持光脉冲传输过程中形状不变^[1].而光纤损耗造成的脉冲能量的损失,则用每一段传输距离后的光放大器来补偿,保持其非线性效应作用的存在.利用这个原理,美国贝耳实验室的 Mollenauer 等人设计出的孤子通信试验系统^[2].日本 NTT 则实现了以直路 10 Gb/s 脉冲传输 1000km 的实验;英国 BTRL 已完成速率为 2.5 Gb/s 传送 10000km 的实验;还有较复杂的系统做了更远距离、更高速率的孤子传输实验.这些系统的试验成功,为光孤子通信的实用化奠定了坚实的基础.

* 1998-12-14 收到初稿,1999-04-14 修回

2 光孤子通信系统的技术基础

与普通的线性光通信系统一样,光孤子通信系统也要有信号源、调制器件、传输媒介、中继器和检测器件等组成。其中传输媒介同样使用低损耗波长窗口 $1.55\mu\text{m}$ 的普通单模光纤(SMF)或色散位移光纤(DSF),中继器则采用色散补偿的全光系统,中继器也采用光放大器,特别是掺铒光纤放大器(EDFA)引起了光通信领域的广泛关注。

在近年的实验系统中,孤子源一般采用增益开关 DFB-LD 或外腔锁模 LD。半导体 LD 体积很小、结构简单、重复频率高,适用于高速率的光孤子源。半导体 LD 输出高斯型或高斯型光脉冲,可以通过外调制成 Sech 形脉冲,或在光纤中演化成渐近光孤子脉冲,因而这些 LD 实际上是一种准光孤子源。由于 LD 功率不足或因插入滤波器与调制器件的插入损耗,使光脉冲的功率下降。目前均采用 EDFA 增益放大,以达到形成光孤子所需的光功率。增益开关激光器(GS-DFB-LD)的工作比较稳定,被认为是最实用并具有发展前景的光孤子源。LD 光孤子源的另一种类型,是美国、英国采用短外腔锁模 $1.55\mu\text{m}$ LD(ML-EC-LD)激光器,外延腔长可使锁模所需的调制频率降低,阈值也相应降低。ML-EC-LD 光孤子源大都使用 LiNbO_3 外调制器使光脉冲形成准光孤子脉冲, $5-7\text{dB}$ 的插入损耗可以用 EDFA 来补偿。美、英、日等国在 LD 准光孤子源、 LiNbO_3 外调制器、色散位移光纤与 EDFA 宽带低噪声光放大器,以及 Pin-LD 与 MEMT 等组成的光接收机的制作与试验方面均已达到传输速率 $10-80\text{Gb/s}$ 的要求,可以讲,建立超高速光孤子通信技术基础已经成熟^[3]。

3 光孤子通信系统发展中的一些关键技术

为推动超高速、超远距离、超大容量全光通

信这一构思尽早成为现实,众多学者开展了实验研究,并用受激拉曼散射能量补偿方案实现了 100Mb/s 、 6000km 的长距离传输^[4]。当前人们普遍采用集中式掺铒光纤放大器(EDFA)作为光孤子能量补充中继放大,实现了循环传输路径 2.5Gb/s 、 14000km ^[5]和点对点 10Gb/s 、 1000km ^[6]的实验结果,为光孤子通信实用化研究向前迈进了一步。但是,随着 EDFA 在光孤子通信系统中的应用,又出现了新的障碍和挑战。

3.1 “动态光孤子通信”控制技术

1990年,Nakazawa 等人提出了“动态光孤子通信”的概念^[7]。其理论依据是: N 阶孤子具有保持光孤子振幅 A 在动态范围 $A-1/2 \leq N \leq A+1/2$ 内,与小损耗光纤传输相结合,对光孤子传输很有益;输入每段传输光纤始端的光孤子功率,应当是基阶孤子($N=1$)标准功率的 $1.4-4.0$ 倍,即形成二阶孤子($N=2$)的功率范围,以便在传输到放大器的临界距离 L_c 后仍然能保持光孤子的特性,再经下一个 EDFA 放大以恢复其功率,进入下一段 L_c 长的传输光纤,使入射光的峰值功率达到一阶孤子功率的 $3-4$ 倍,在光脉冲经过较长的传输后,仍保持光孤子的性质。光孤子在传输过程中,因每段 L_c 输入的初始峰值功率较大,脉宽先是变窄,然后经损耗光纤而逐渐展宽,在恢复到与输入脉宽大致相等的距离上用 EDFA 放大以恢复原来的功率。这样做的目的是使输入的光孤子预先放大,以保证光孤子脉冲在动态的起伏变化中稳定地传输更大的距离。

另外一种就是采用预加重动态光孤子通信。为了提高光放大器的间距,从补偿光纤损耗、压制色散波两方面来考虑,提高注入光孤子脉冲光功率和中继光放大器输出功率,使其路径平均功率等于无损耗时光孤子的阈值功率,以提高功率的预加重系数。通过预加重技术后,可以使放大器间隔为无预加重时的 3 倍以上,具有很大的使用价值。由于注入脉冲的预加重,在系统开始端非线性效应较为显著,而在放大器前非线性较弱,因此在系统中传输的脉冲不

物理

再是严格意义上的光孤子,而只是一种动态非线性类光孤子脉冲.同样,从色散对光孤子脉冲的展宽来考虑,采取相同的措施,提高注入光脉冲功率和放大器的输出功率,使光脉冲的脉宽在进入光纤后就受到一非线性压缩,因而光孤子脉冲可以传输更长的距离 L_c 后才展宽,直至恢复到初始脉宽,然后再经放大器放大.

3.2 光孤子通信系统噪声控制技术

光孤子与 EDFA 的结合,克服了光脉冲稳定传输的两个主要限制——色散和损耗,但又带来了新的问题和限制:其放大自辐射噪声 (ASE) 又限制了光孤子通信系统中可能达到的最大通信能力,即所谓的 Gordon - Haus 极限问题^[8].例如,EDFA 的 ASE 对光孤子脉冲到达终端时间积累的影响和系统通信能力的限制及 ASE 噪声积累对系统信噪比的影响等.如再考虑光源的噪声和频率啁啾时,RL 将进一步降低.因此能否控制系统噪声,增大放大器间隔就成了光孤子通信技术有无实用价值和能否走向商用的关键问题.对这一问题,近年来提出了多种解决方案,其中之一是噪声的频域滤波传输技术^[9,10].其基本思想是:在光孤子通信系统中的每个 EDFA 后接进一个光滤波器,当单个滤波器带宽远大于光孤子脉冲信号带宽,而全部滤波器级联的线性带宽远小于光孤子脉冲信号带宽的时候,就可以克服 Gordon - Haus 限制.由于仅在系统中接入无源光学滤波器,所以称这种控制方法为被动控制.这种系统,比不加滤波器约提高 5 倍.在系统噪声频域滤波控制技术中,光滤波器的引入,引起了附加损耗.为使光孤子脉冲仍能稳定传输,必须提高 EDFA 的增益值,增益的提高又引起 ASE 噪声的增大,这种噪声又通过色散和非线性相互作用使光孤子频谱结构发生变化和平均频率发生漂移,降低了滤波器的作用.为使滤波器仍能起到滤波和噪声控制作用,可逐渐改变沿系统设置各滤波器的中心频率.这是一种改进后更为合理的频域滤波控制技术,称为移频引导滤波器.采用移频技术后,可使 ASE 噪声比不用滤波器时降低几千倍以上.移频滤波控制技术,不仅能

压制 EDFA 的 ASE 噪声,而且也能控制像输入脉冲频率失配产生的色散波和其他各种扰动产生噪声的影响,使系统的传输特性更稳定,通信能力将大大提高.

3.3 光孤子系统噪声的主动时域控制技术

ASE 噪声的频域传输控制,能使噪声能量、光孤子均方频率和到达时间抖动大大降低,通信能力 (RL) 提高几倍,突破了 Gordon - Haus 极限^[12,13].而且这种方案系统结构简单,仅须在放大器后接入一无源光滤波器,并可方便地实现波分复用,使通信容量进一步提高,是一种简单实用的控制技术方案.但是,这种技术方案并不能完全滤除噪声,总有一部分噪声要通过滤波器,这部分噪声积累在长途通信系统中仍是一种致命有害的因素.它将对通信系统性能产生有害影响. NTT 提出了一种时域和频域复合控制技术.这种新的噪声控制技术是在沿着光孤子传输的路径上,每隔几个 EDFA 和一定的距离,接入一光调制器和滤波器,从链路传输的光孤子数据中提取出时钟信号,输入到光调制器,对光孤子脉冲进行周期性同步调制,使光孤子脉冲变窄,频谱展宽,频率漂移和系统噪声降低,脉冲位置得到校准和重新定时.等再通过滤波器滤除频谱侧翼时,又使光孤子脉冲幅度和脉宽的随机涨落大大降低,因而从根本上突破了噪声对通信系统能力 Gordon - Haus 极限,例如采用频域噪声控制可使噪声引起的光孤子位置抖动降低 50%,而当采用时域噪声控制时,孤子位置抖动就基本消失了.与单纯频域被动控制技术不同,时域控制是利用时钟信号对噪声进行控制的,即所谓主动传输控制.主动控制不仅能控制 EDFA 的 ASE 噪声,克服 Gordon - Haus 限制,而且也能降低通过滤波器的积累噪声和因光孤子相互作用产生的孤子位置抖动,扩大放大器之间的间隔,是一种十分有效的光孤子系统噪声控制技术.

3.4 “路径平均光孤子”控制技术

贝耳实验室的 Mollenauer 等人提出了“路径平均孤子”的概念^[11].他们的结果表明:光孤子经过多个 EDFA 放大进入光纤传输后,每段

L_0 长的光纤路径平均光孤子功率近似等于无损耗光纤中的基阶标准光孤子的功率,两者非线性作用的积累也近似相等,在平衡色散展宽后的脉冲形状也一样.只要每次 EDFA 放大的光孤子在 DSF 中传输时使用光孤子的平均功率等于基阶光孤子的标准功率,就能保持光孤子在光纤中做到不变形传输.

3.5 光孤子相互作用控制技术

为了克服光孤子之间相互作用对光孤子通信系统通信的影响,已发现可以采用时域控制技术来压制光孤子之间的相互作用^[14].在相邻光孤子传输相互碰撞前,接入一窄带光滤波器,可消除孤子幅值和脉宽的随机涨落,使光孤子脉冲传输稳定,实现无误码长距离传输.克服光孤子相互作用的另一种技术是带宽限制放大法,在补偿孤子能量每一个 EDFA 后接入一带通滤波器,但 EDFA 的附加增益和滤波器的频率响应特性需专门设定,以满足最大限度降低光孤子相互作用的要求.

3.6 光孤子能量补偿技术

能量补偿技术根据孤子得到能量的方式可以分为分布式传输放大与周期性集中式传输放大方案^[8].分布式传输放大可利用以下 3 种方案:将传输光纤作能量补偿放大媒质,利用光纤非线性效应产生的受激拉曼增益补偿光纤的损耗;利用光纤非线性四波混频效应产生的参量放大增益补偿光纤的损耗;以及利用低浓度掺铒光纤(铒离子的浓度一般为 0.5—2.5 ppm)作为传输介质,同时利用其产生的受激放大增益补偿光纤损耗,实现光孤子脉冲的透明传输.周期性集中式传输放大方案可以分为 2 种:沿光纤系统每隔一定距离接入一个 EDFA,利用平均孤子(或称为波导中心孤子)和动态孤子传输,实现光孤子脉冲的透明传输.

受激拉曼散射是一种放大光孤子的有效方法,这种放大作用可分布于光孤子传输光纤的全过程.频率高于光孤子约 13 THz 的泵浦波从中继站向两个方向耦合进入光纤,通过与光纤材料的分子振荡的作用,对载波频率 $\omega_0 = \omega_p - \alpha_k$ 的孤子产生放大,这里的 ω_p 和 α_k 分别是

泵浦波及分子振动的频率.拉曼放大的优点是有很宽的带宽(约 10 THz),可满足频分多路工作的要求.同时,向两个方向注入光纤的泵浦波功率在光纤中有均匀的分布,得到较均匀的增益.另一种方案是采用掺铒光纤放大器.在光纤线路中每隔 L 距离接入一段掺铒光纤,泵浦功率通过耦合器注入,放大作用发生在掺铒光纤段内,放大带宽在数 nm,其优点是所需的泵浦功率低于拉曼放大.这两种能量补偿方法在实验上取得成功,为实际建立超长距离、超高速和超大容量的全光接力光孤子通信系统奠定了基础.在光孤子通信系统中,虽然无中继距离目前限制在 100 km 以下,但中继设备只需泵浦源和耦合器(或加一段高浓度的掺铒光纤),放大器的功率只是给光孤子补充能量,无需检出后再重新产生信号脉冲.这种全光型的中继设备较为便宜,而且可频分多路工作.光孤子通信系统中中继设备的上述优点基本克服了线性光纤通信系统中中继设备在性能提高和价格降低这两方面目前面临的困难,因而预示着光孤子通信系统将会逐渐取代现有的线性光纤通信系统,在未来的光纤通信工程中扮演主要角色.

3.7 高阶光孤子脉冲脉宽压缩技术

利用高阶(例如三阶)光孤子在前 1/3 周期脉宽变化规律,补充损耗产生脉冲加宽来提高系统的中继距离^[15],例如对 1.55 μm 波长窗口的单模光纤中传输的三阶光孤子,当初始脉宽为 100 ps 时,其周期距离为 780 km.实验结果表明,在 8 Gb/s 的 1.55 μm 光纤通信系统中,当脉冲无频率漂移时,中继距离提高到约 200 km,所需的高阶光孤子的峰值功率仅为 3 mW,利用现有的半导体激光器即可达到要求.

3.8 色散补偿与色散管理控制技术

色散补偿技术是指在孤子通信系统中接入正常色散光纤,控制因系统噪声引起的孤子到达时间抖动的积累,结构简单方便,并可采用波分复用技术提高通信容量;另一种是在带宽限制放大控制方案的基础上,在终端接上正常色散光纤,但补偿量较小,以减弱色散展宽.这种双重控制可以达到最佳补偿效果;最后一种是

在每一只光放大器前接一段正常色散光纤,采用周期性拉曼分散补偿(每段补偿量小),并接入滤波器作为辅助手段,减少因正色散补偿引起的波形畸变,可以达到理想的补偿效果,是一种简便而实用的传输控制方案.色散补偿控制方案中,输入信号功率按传输段参数设计.但无论是集中补偿或分散补偿,接入的正常色散光纤较短(小于1km),色散量较大,将引起较多的色散波,降低了系统的信噪比.在这基础上,有人提出一种新的色散补偿控制方案——色散管理孤子控制技术^[16,17].它也是周期性分散补偿方案.一般正常色散补偿光纤较长,色散量较小,而沿系统平均色散还是负值,输入功率按全程平均色散值来设计.这种方案的优点是,孤子可以在局域正常光纤色散中传输,突破了传统认为的孤子只能在反常色散光纤中传输的概念.通过合理系统统计,可以得到较小的平均色散,较大的色散长度、较长的中继距离、较小的时间抖动积累,孤子在传输中显现周期性的压缩和展宽.利用色散管理孤子控制技术进行了现场直通传输试验,是一种简便、经济的系统技术,具有诱人的应用前景.

4 结语

光孤子传输是光孤子通信的核心问题,是实现超高速、超长距离、全光通信的基础.影响光孤子传输的因素很多,例如光纤损耗、放大器的自发辐射噪声、光孤子之间的相互作用等,因此,研究光孤子的各种特性显得特别重要.在实

际光孤子通信系统的研究中,将采取已发展和探索出来的不同传输和控制技术,以克服影响光孤子传输的各种不利因素,设计出不同的传输系统.

参 考 文 献

- [1] 钟卫平,李中辅,欧阳荣.物理,1993,22:339—345
- [2] Mollenauer L F, Gordon J P. Phys. Rev. Lett., 1980, 45: 1095—1098
- [3] Hasegawa A, Kodama Y. Solitons in Optical Communication. Oxford: Clarendon Press, 1995. 218—250
- [4] Smith K, Mollenauer L F. Opt. Lett., 1988, 14: 751—753
- [5] Mollenauer L F, Neubelt M J. Electron. Lett., 1991, 27: 2055—2056
- [6] Nakazawa M, Yamada E. Electron. Lett., 1991, 27: 1270—1272
- [7] Nakazawa M, Suzuki K. IEEE Quantum J. Electron., 1990, 26: 2095—2102
- [8] Gordon J P, Haus H A. Opt. Lett., 1986, 11: 665—667
- [9] Mecozzi A, Moores J D. Opt. Lett., 1991, 11: 1841—1842
- [10] Matsumoto M. Opt. Lett., 1993, 18: 897—899
- [11] Mollenauer L F. J. Lightwave Technology, 1991, 9: 194—198
- [12] Kodama Y. Opt. Lett., 1992, 17: 31—33
- [13] Matsumoto M. Opt. Lett., 1994, 19: 183—185
- [14] Kodama Y. Electron. Lett., 1991, 27: 1931—1933; 1993, 29: 226—228
- [15] Hasegawa A. Optical Solitons in Fibers. New York: Springer-Verlag, 1990
- [16] Suzuki M, Morita I. Electron. Lett., 1995, 33: 2027—2029
- [17] Nakazawa M, Kubota H. Electron. Lett., 1995, 31: 216—218