

文章编号:1004-4213(2010)s1-0083-5

两类高速长距离非线性光传输系统的比较

蔡炬,孙捷

(成都信息工程学院 通信工程学院,成都 610225)

摘 要:通过分析光孤子传输系统(包括恒色散孤子、色散管理孤子)和准线性传输系统的概念及其传输特性,对这两种非线性光传输系统的发展前景提出了明确的观点.指出恒色散孤子利用色散效应和自相位调制达到平衡时实现脉冲的保形传输,但其高脉冲功率的特点使定时抖动性能严重劣化.色散管理光孤子则通过在传输线路上周期性交替采用正负色散系数的光纤,在保持较高的本地色散的同时,降低了路径平均色散,很好地解决了恒色散孤子系统的问题,但由于在传输过程中始终将脉冲宽度限制在一个比特时隙内,相邻信道脉冲间的频谱重叠将造成系统性能急剧下降.增加信道间隔虽然能解决这个问题,但其带宽利用率将明显降低,因而更适用于单信道的高速超长距离传输;与光孤子传输系统不同,准线性传输系统将非线性效应作为一种有害因素来进行控制,并通过强色散管理将路径平均色散保持在 0 值附近,使其频谱宽度戏剧性地降低,信道间的非线性作用也大大降低,因而非常适用于波分复用的高速超长距离传输.

关键词:光孤子;准线性;非线性;色散管理

中图分类号: TN913.7

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb201039s1.0083

0 引言

随着信息社会的迅猛发展,人们对信息服务的需求量与日俱增,这使得传输网络的容量需求激增.提高系统传输容量的方式有两个:一是提高信道传输速率,二是增加信道数量.与低速传输系统相比,高速传输系统中的非线性效应已成为影响系统性能的一个不可避免的主要因素,必须采取有效措施控制其不利影响.本文将探讨适用于高速长距离传输的两类传输系统——光孤子传输系统(包括恒色散光孤子、色散管理光孤子)和准线性传输系统进行探讨,并对它们的发展前景提出自己的观点.

1 光孤子传输系统

光纤中的孤子通信是利用光纤色散效应与自相位调制(Self-Phase Modulation, SPM)这种非线性效应对光孤子的相互作用达到平衡时实现的一种稳定传输的通信方式.光纤中的群速色散(Group Velocity Dispersion, GVD)使脉冲在传输过程中不断展宽,而 SPM 使脉冲压缩.当色散与 SPM 对脉冲的作用达到平衡时,脉冲的展宽和压缩刚好抵消,孤子在传输过程中将始终保持波形不变,从而可以实现超长距离传输.利用色散与 SPM 之间的平衡,

光孤子完全摆脱了色散和 SPM 对传输速率和通信容量的限制,基于光孤子的通信系统能提供非常高的传输速率,对偏振模色散(Polarization Mode Dispersion, PMD)有抑制作用,具有保形传输的特点,能够传输极长的距离(可达上万公里)而不发生形变.如此多的优点,使光孤子通信很快成为研究的热点.光孤子通信技术曾被公认为是下一代通信系统中最有发展前途的传输方式之一.

根据光孤子传输系统受损耗、色散、非线性、双折射效应和孤子相互作用等各种因素的影响,可从不同的角度对光孤子传输方案进行分类.从光孤子通信技术发展历程的重要变化这一角度出发,可以根据传输线路中光纤色散的变化情况,将其分为恒色散孤子系统和色散管理孤子系统两大类.

1.1 恒色散孤子系统

恒色散孤子传输系统又称为经典孤子系统.经典孤子的脉冲形状为双曲正割(sech)形,光孤子的行为可以用归一化非线性薛定谔方程^[1]来描述

$$i \frac{\partial q}{\partial Z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial T^2} + |q|^2 q = 0 \quad (1)$$

式中 q 、 Z 、 T 分别为归一化幅度、距离和时间.此方程能够用逆散射方法求得稳定的孤子解.这种系统的特点是,光纤的色散系数和非线性系数沿传输线

基金项目:四川省教育厅自然科学基金(No. 09ZB012)和成都信息工程学院科研基金(No. KYTZ201038)资助

第一作者:蔡炬(1970—),男,高级工程师,主要研究方向为高速光传输系统、光网络和光纤传感. Email: jvcai@cuit.edu.cn

收稿日期:2010-11-08;修回日期:2011-02-22

路恒定不变. 在无损光纤中, 可以通过设定适当的孤子功率, 使光纤色散效应和非线性效应对脉冲的影响互相抵消, 从而使孤子始终保持初始脉冲形状. 或者说, 经典孤子同时克服了色散效应和非线性效应的不利影响, 从而实现了超长距离的稳定传输, 如图 1. 由于非线性效应与孤子功率密切相关, 因此孤子的输入功率不能任意改变, 需要根据色散和非线性平衡的需要进行精确设定. 但是, 由于光纤损耗不可避免, 光纤放大器的加入使这一情况发生了变化; 同时, 随着传输速率的提高, 光孤子脉冲频谱进一步展宽, 系统更易受光放大器自发辐射 (Amplified Spontaneous Emission, ASE) 噪音的影响, 由此导致的 Gordon-Haus 效应 (会造成定时抖动) 和幅度抖动更加严重. 同时, 由于需要利用非线性效应平衡色散效应, 孤子脉冲的功率也随之提高. 虽然通过减小孤子脉宽或增加光纤色散来增加孤子功率的确能提高信噪比, 但同时却会造成更为严重的定时抖动. 由于这一矛盾得不到很好的解决, 恒色散孤子系统的应用受到了极大的影响. 事实上, 在不采取其它控制措施的情况下, 孤子的传输性能甚至不如传统的非归零 (Non Return Zero, NRZ) 脉冲, 恒色散孤子传输系统的应用受到了极大的阻碍.

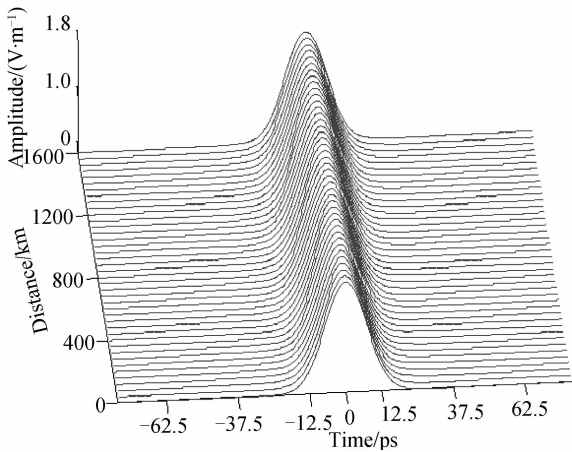


图 1 单孤子在恒色散孤子传输系统中的波形演化
Fig. 1 The waveform evolution of a single soliton in conventional constant dispersion soliton transmission system

1.2 色散管理孤子系统

色散管理孤子 (Dispersion Management Soliton, DMS) 传输方案通过在传输线路上周期性交替采用正负色散系数的光纤, 在保持较高的本地色散的同时, 降低了路径平均色散, 极大地修正了光纤通信系统的非线性光学性质和孤子传输的特性^[2]. 图 2 中 D_1, D_2 分别表示传输光纤, 和色散补偿光纤 (Dispersion Compensating Fiber, DCF) 的色散系数; \bar{D} 为路径平均色散; Z_1, Z_2 表示一个色散管理周期中传输光纤和 DCF 的长度. DMS 在周期性

集总放大系统中的传输规律可由修正后的归一化非线性薛定谔方程来描述

$$i \frac{\partial q}{\partial Z} + \frac{d(Z)}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial T^2} + Q(Z) |q|^2 q = 0 \quad (2)$$

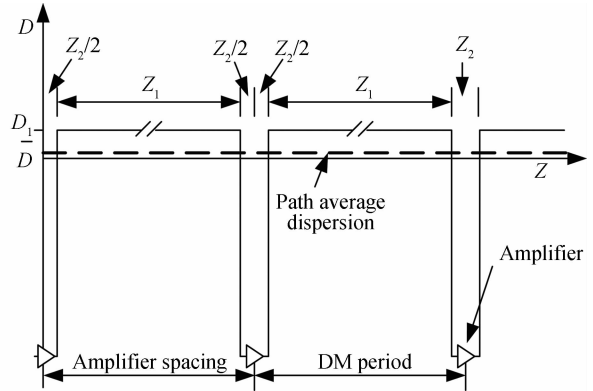


图 2 DMS 传输系统的一种优化色散分布示意图
Fig. 2 One of the optimized maps of DMS system

式中 $d(Z)$ 为由路径平均色散 \bar{D} 归一化的群速色散, 与距离相关; $Q(Z)$ 为归一化非线性系数. 此方程有脉冲形式的周期解, 即 DMS. DMS 的脉冲形状为高斯形, 它通过色散管理周期中的累积残余色散效应与非线性效应相平衡来实现稳定传输. 出于克服非线性效应的需要, DMS 传输系统仍需要保持一接近但不等于零的路径平均色散值. 由于本地色散系数的周期性变化, DMS 脉冲不再始终保持其初始波形进行传输, 其脉宽会随色散管理分布周期同步地展宽和压缩, 表现为一种稳定的周期性变化的“呼吸”状动力学行为, 如图 3.

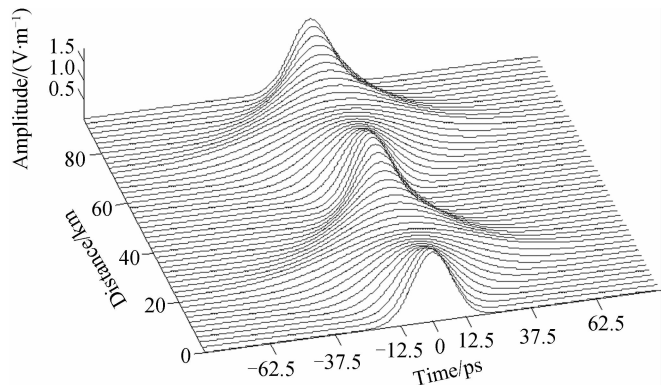


图 3 单色散管理孤子在传输过程中的波形演化
Fig. 3 The waveform evolution of a single soliton in DMS system

为了准确描述 DMS 在传输中的展宽程度, 引入色散分布强度 S 参量

$$S = \frac{\lambda^2 D_1 Z_1 - D_2 Z_2}{2\pi c \tau_{FWHM}^2} \quad (3)$$

式中 τ_{FWHM} 为 DMS 的初始半极大全宽. 研究表明^[3-4], 在色散分布强度 $S \approx 1.6$ 时, DMS 传输系统达到最优性能, 如图 4^[4]. 此时, 一方面 DMS 得到适度展宽, 非线性效应的影响得以减小; 同时由于

其展宽程度被限制在一个比特时隙内,孤子之间的相互作用也得到了很好限制。

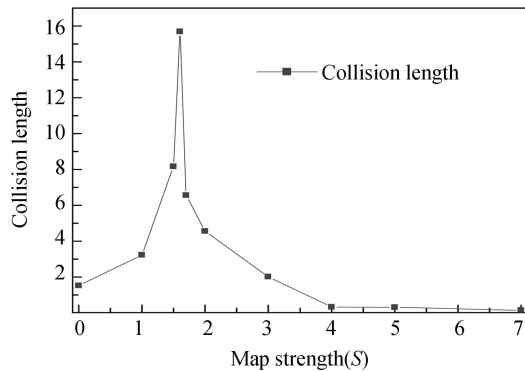


图4 DMS传输系统在 $S \approx 1.6$ 时达到最佳性能
Fig. 4 Optimal performance of DMS system is reached when $S \approx 1.6$

周期性色散管理技术应用于孤子系统,不仅可以提高孤子信号的发射功率以提高信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR),同时也能降低定时抖动,有效地解决了恒色散孤子传输中高SNR和低相互作用不能兼顾的问题。因此,DMS传输方案一经提出,便迅速得到了广泛重视。已有文献报道单信道DMS传输系统获得了160 Gb/s的速率传输数千公里的优异成绩^[5]。

不过,随着信道速率的持续提高和信道数量的增加,DMS系统的不足也逐渐显露出来。由于色散分布强度 S 与脉宽的平方成反比,由上述 S 的表达式可知,为了保持 $S \approx 1.6$,要么采用具有低色散系数的传输光纤($|D| < 2$ ps/(km·nm)),要么极大地降低色散管理周期的长度,即采用密集色散管理(Dense Dispersion Management, DDM)方案。色散位移光纤(Dispersion Shifted Fiber, DSF)满足低色散系数的要求,但我们知道,DSF应用于波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)系统时,其零色散波长正好位于系统的工作波长附近,此时四波混频(Four-Wave Mixing, FWM)的影响将使系统性能产生严重劣化^[6];DDM方案意味着对不同的DMS系统,需要定制不同的DDM传输光纤,这将极大地增加系统成本。并且,DDM的色散管理周期不能过短,太过频繁的色散补偿将使DDM光纤表现出类似于低色散值的常色散光纤(如DSF)的行为^[7]。文献^[5]表明,DMS在单信道情况下能以160 Gb/s的速率传输2 200 km,但在信道数为7,信道间隔为400 GHz的情况下,传输距离急剧下降至100 km。很明显,由于在传输过程中始终将DMS脉冲限制在一个比特时隙内,相邻信道DMS脉冲间的频谱重叠是造成系统性能急剧下降的重要原因。通过增加信道间隔(如增加至1 THz)的方法能

够解决这个问题,但其带宽利用率将明显降低。文献^[8]通过应用一种特殊的周期性群时延色散补偿模块可以使DMS在单信道速率为10 Gb/s,信道间隔为50 GHz,共37个信道的密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)系统中传输9 000 km,但该方案未能在更高速率的系统中成功应用。迄今为止的国外文献也未见有更高速DWDM DMS传输系统成功应用的相关报道。DMS似乎并不适用于信道速率大于40 Gb/s的DWDM系统。

2 准线性传输系统

准线性系统中脉冲的传输仍可由归一化的非线性薛定谔方程描述。与DMS传输方案类似,在高速准线性传输方案中,仍采用色散补偿方案,不过它不再考虑色散效应与SPM之间的互相平衡,而是简单地将非线性效应当成一种有害因素来考虑。因此,其色散分布强度 S 值可以很大,不必采用密集色散管理方式或DSF进行系统配置,色散补偿可以在各个色散分布周期的起点或(和)终点进行,也可以在整个传输链路的起点或(和)终点进行。这种配置使系统的色散长度远小于非线性长度,色散的影响将起支配作用,而SPM的影响则处于可以被忽略的地位。对WDM准线性传输系统而言,虽然不同信道间脉冲的非线性相互作用也会降低传输性能,但色散效应的影响仍然对各个信道中脉冲的演化起着主导作用。

由于具有大 S 值这一特性,随着色散的积累,准线性脉冲在光纤中传输时被迅速展宽到很多个(可多达上千个)比特时隙中,脉冲波形在进行色散补偿前不再能被辨识(波形演化如图5所示)。光脉冲迅速且大范围的展宽使其受到SPM的影响急剧降低,因此由SPM导致的脉冲最终畸变最小化。通过在适当的地方进行色散补偿,使系统的累积残余

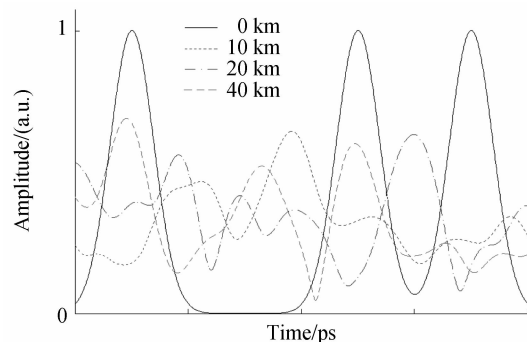


图5 准线性传输的一种配置方案中,脉冲序列中的一部分(1011)在传输0、10、20、40 km后的波形
Fig. 5 Waveforms at 0 km, 10 km, 20 km, and 40 km of parts of bit sequence(1011) in one of the quasi-linear transmission system configuration

色散等于或接近于 0, 脉冲最终将恢复为接近初始状态的波形. 这样的传输体系, 其传输特性表现出某些与线性传输系统相似的特点. 这也是准线性传输系统这一称谓的来源.

与线性系统不同的是, 准线性系统中脉冲的调制格式和占空比、色散分布图、信道间隔的选择对能否将非线性的影响降低到一个可以接受的程度起着至关重要的作用. 如果配置有偏差, 非线性效应将对系统性能产生严重的影响. 因此, 严格地说, 准线性传输系统仍是属于非线性传输系统这一范畴的.

在高速准线性传输系统中, 由于强色散分布强度导致脉冲极大程度地展宽, 从而导致脉冲间的严重重叠, 加上非线性折射率导致的非线性相移, 造成信道内脉冲间的交叉相位调制 (Intra-channel Cross-Phase Modulation, IXPM) 和信道内四波混频 (Intra-channel Four-Wave Mixing, IFWM)^[9] 这两种信道内非线性效应. 它们决定了系统每比特所能携带的最大能量和最佳色散分布图的形式. 研究表明, 与 WDM 系统中信道间的交叉相位调制 (Cross-Phase Modulation, XPM) 和 FWM 类似, IXPM 会使脉冲产生频移, 并通过色散效应, 最终导致脉冲的定时抖动. 而 IFWM 会导致脉冲的幅度抖动和寄生脉冲 (ghost pulse) 的产生. IXPM 和 IFWM 的存在限制了脉冲的最大输入功率. 从图 6^[10] (插图为整个 PRBS 序列的眼图) 可见, 160 Gb/s 准线性系统中的光脉冲在经过 2 800 km 的传输后, 出现了明显的幅度抖动和定时抖动, 在 '0' 比特处出现了寄生脉冲. 在脉冲功率较小时, IXPM 对系统性能的影响较大. 但是, 为了尽可能增大光信噪比 (Optical Signal to Noise Ratio, OSNR), 需要使系统工作在尽可能高的功率上. 由于 IXPM 效应与脉冲峰值功率成正比, IFWM 效应与脉冲峰值功率的三次方成正比^[7], 因而随着脉冲功率的增加, IFWM 会变为主要的非线性相互作用. 另外, 通过设计适当的色散管

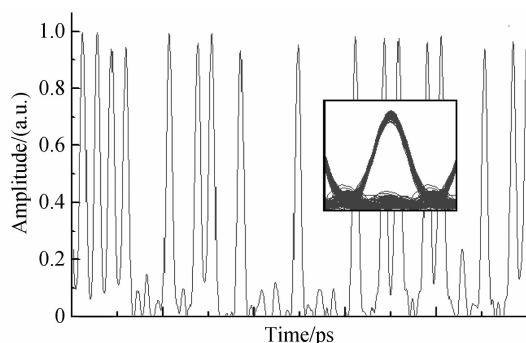


图 6 160 Gb/s 准线性传输系统中部分光脉冲在传输 2 800 公里后的波形

Fig. 6 Waveform of parts of bit sequence after 2 800 km transmission in a quasi-linear transmission system

理方案, IXPM 的效应会得到有效抑制. 因此, 对 IFWM 进行研究并提供相应解决方案就成了准线性系统研究的一项重要内容. 目前已有的或正在研究的主要解决方案有: 相位编码方案^[11]、不等距脉冲方案^[12]、交替变换偏振方案^[13]、光相位共轭方案^[14]、以及强制编码方案^[15]等.

在 WDM 高速准线性传输系统中, 由于脉冲在时域中的强烈展宽导致其频谱宽度戏剧性地降低, 因此不同信道间的 XPM 和 FWM 等非线性相互作用通常比信道内非线性相互作用弱很多, 所以降低信道内非线性相互作用也能大幅度地提高 WDM 系统的传输性能. 文献[10]表明 160 Gb/s 的 WDM 准线性传输系统能够传输数千公里. 而在 DMS 系统中, 由于信道间 XPM 导致的定时抖动是影响系统性能的主要因素, 降低信道内相互作用并不能显著提高 WDM DMS 系统的整体性能.

3 结论

在 IM/DD 光纤通信系统中, 人们通过两种方式提高系统的传输速率. 一是提高系统的信道速率, 二是提高系统的信道数量. 由于信道速率的增加势必增加传输所需带宽, 导致信道间隔的增加, 因而这两种方式是互相对立和统一的. 在单信道传输时, DMS 具有同速率下准线性传输无可比拟的优势; 但是对 WDM 系统, 准线性传输方案却更具优势. 随着光纤制造技术的持续改进, 可用带宽的不断增加, 笔者认为, DMS 适合在要求单信道超长距离的某些特殊场合中应用, 而准线性传输技术则更适应未来光纤通信的普遍发展方向.

参考文献

- [1] 杨祥林, 温扬敬. 光纤孤子通信理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [2] CARROLL S S, ATAI J. Interaction of solitons in a stabilized dispersion managed link[J]. *JOSA B*, 2007, **24**(5): 1160-1165.
- [3] YU T, GOLOVCHENKO E A, PILIPETSKII A N, et al. Dispersion managed soliton interaction in optical fibers[J]. *Optical Letters*, 1997, **22**(11): 793-795.
- [4] CAI Ju, YANG Xiang-lin. Dispersion-managed soliton interactions in fibers with randomly varying birefringence[J]. *Science in China*, 2003, **46**(2): 153-160.
- [5] del DUCE A, KILLEY R I, BAYVEL P. Comparison of nonlinear pulse interactions in 160-Gb/s quasi-linear and dispersion managed soliton systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(5): 1263-1271.
- [6] TKACH R W, CHRAPLYVY A R, FORGHIERI F, et al. Four-photon mixing and high-speed WDM systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, **13**(5): 841-849.
- [7] ESSIAMBRE R J, RAYBON G, MIKKELSEN B. Optical fiber telecommunications iv: b, systems and impairments[M]. New York: Academic Press, 2002: 232-304.
- [8] MOLLENAUER L F, GRANT A, LIU X. Experimental test of

- dense wavelength-division multiplexing using novel, periodic-group-delay-complemented dispersion compensation and dispersion-managed solitons[J]. *Optics Letters*, 2003, **28**(21): 2043-2045.
- [9] NEOKOSMIDIS I, KAMALAKIS T, SPHICOPOULOS T. Multicanonical Monte Carlo modeling of wavelength division multiplexed differential phase shift keying systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(22): 5065-5072.
- [10] CAI J, GAO Z. Investigation of map strength in 160 Gb/s dispersion managed quasi-linear transmission system [C]. 2010 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2010: 1-3.
- [11] ZHANG Q, MENYUK C R, BAJRACHARYA R, *et al* . On the Gaussian approximation and margin measurements for optical DPSK systems with balanced detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(12): 1752-1760.
- [12] KUMAR S. Intrachannel four-wave mixing in dispersion managed RZ systems [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, **13**(8): 800-802.
- [13] XIE C, KANG I, GNAUCK A H, *et al* . Suppression of intrachannel nonlinear effects with alternate-polarization formats[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(3): 806-812.
- [14] CHOWDHURY A, RAYBON G, ESSIAMBRE R J, *et al* . Compensation of intra-channel nonlinearities in 40 Gb/s pseudo-linear systems using optical phase conjugation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(1): 172-177.
- [15] PECHENKIN V, KSCHISCHANG F R. Constrained coding for quasi-linear optical data transmission systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(12): 4895-4902.

Comparison of Two Kinds of High-speed Long-haul Nonlinear Optical Transmission Systems

CAI Ju, SUN Jie

(School of Communication Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Transmission characteristics of optical soliton transmission system (conventional soliton, dispersion management soliton) and quasi-linear transmission system were analyzed respectively. Conventional solitons keep the pulse shape by balancing the dispersion and nonlinear effect during the transmission, but the timing jitter is severely degraded as the pulses' high power. Dispersion management solitons solve this problem by using fibers with normal and abnormal dispersion coefficients in turn, which lower the average path dispersion while keep the higher local dispersion. But the system performance degraded rapidly by neighboring channels' spectrum overlapping as the pulse width is always limited in one bit slot. So dispersion management soliton is proper for single channel high speed long haul transmission. Different with soliton transmission, quasi-linear transmission control the nonlinear as a harmful effect, and keep the average path dispersion around zero by strongly dispersion management, so the spectrum width is degraded dramatically, and so do the nonlinear interaction among the channels. As this reason, quasi-linear transmission is suitable for high speed long haul wavelength division multiplex transmission.

Key words: Optical soliton; Quasi-linear; Nonlinear; Dispersion management