

色散补偿光纤传输系统的最佳补偿方案

周志强 唐余亮

(重庆邮电学院,重庆,400065)

谢崇进

(北京邮电大学,北京,100876)

摘要: 研究了采用色散补偿光纤传输系统的最佳补偿方案,经研究发现,混合补偿方案可以大大减小光纤非线性效应的影响,提高系统传输距离。此外,还对非归零码(NRZ)和归零码(RZ)的传输性能进行了比较。

关键词: 色散补偿 光纤通信 色散补偿光纤 非线性

Optimum schemes of dispersion compensation transmission systems using dispersion compensation fibers

Zhou Zhiqiang, Tang Yuliang

(Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing, 400065)

Xie Chongjin

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, 100876)

Abstract: The optimum schemes of dispersion compensation transmission systems using dispersion compensation fibers are studied in this paper. It is found that the hybrid compensation scheme can reduce the influences of the fiber nonlinearity and increase the transmission distance greatly. In addition, the transmission performances of NRZ and RZ code are compared.

Key words: dispersion compensation optical communications dispersion compensation fiber nonlinearity

引 言

由于光纤放大器的出现,光纤通信系统发生了巨大的变化,传统的光-电-光型中继器被光纤放大器取代,损耗已不再是限制光纤传输距离的因素。但是,光纤放大器只是一种模拟器件,它不能对信号进行再生,信号在传输过程中,由于色散导致的脉冲展宽将产生严重的码间干扰,因此,对于采用光纤放大器的高速率、长距离的光纤通信系统,色散成了限制系统传输距离的主要因素,特别是对于已经铺设的标准单模光纤,色散问题尤为严重。近年来,随着光纤传输速率的不断提高,色散补偿成了人们研究的热点。

采用色散补偿光纤进行色散补偿的思想早在 1980 年就被提出^[1],但是,直到光纤放大器发明以后,色散补偿光纤才受到了广泛的重视和研究。由于色散补偿光纤的产品比较成熟、性能稳定、不易受温度等外界环境的影响及很宽的工作带宽等特点,色散补偿光纤成了目前最实用的一种色散补偿方法并得到了广泛的研究^[2~10]。

在色散补偿系统中,由于光纤非线性的影响,光纤的色散不能完全被补偿。对于长距离传输系统,这种剩余色散随着传输距离的增加逐渐积累,限制了传输距离的提高。降低光纤的入纤功率可以减小光纤非线性的影响,但是,由于光纤放大器噪声的影响,输入功率的降低将造成接收端信噪比的下降,限制了信号的传输距离。这两种限制因数是色散补偿系统所固有的,

很难消除,但可通过合适地配置系统,适当地选择传输码型来减小这些限制因数的影响,从而最大限度的提高系统的传输距离^[2~4]。

笔者主要研究采用色散补偿光纤的最佳补偿方案,并对非归零码(NRZ)和归零码(RZ)的传输性能进行比较。

1 系统模型和数值模型

我们研究的几种补偿方案如图 1 所示,补偿间隔为 50km。图 1a、图 1b 分别为前补偿、后补偿,图 1c、图 1d 为混合补偿,即交替采用前补偿和后补偿,称方案 c 为混合补偿 1,方案 d 为混合补偿 2,其中,SMF 为标准单模光纤,DCF 为色散补偿光纤,Tx 为发射机,Rx 为接收机。系统的参数见表 1。

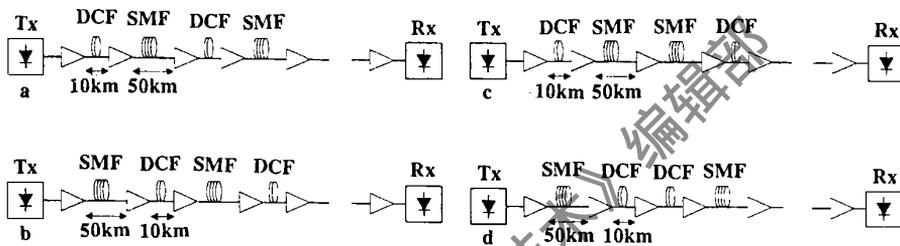


Fig. 1 Compensation schemes

a - pre-compensation b - post-compensation c - hybrid compensation (1) d - hybrid compensation (2)

这里采用数值求解光脉冲在光纤中的传输方程来研究这个问题,光脉冲在光纤中的传输

可由广义非线性薛定谔方程来描述^[1], $\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2} A + \frac{i}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{1}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} = i |A|^2 A$ (1)

式中, A 为光场的慢变包络振幅, z 为传输距离, T 是归一化时间, $\frac{1}{2}$ 是光纤损耗, i 为光纤的非线性系数, $\frac{\partial^2}{\partial T^2}$ 和 $\frac{\partial^3}{\partial T^3}$ 分别为一阶和二阶群速度色散,它们和常用的色散系数 D 和 $dD/d\lambda$ 的关系为:

$$\frac{\partial^2}{\partial T^2} = - \frac{2}{c} D / (2 \pi c) \quad (2)$$

$$\frac{\partial^3}{\partial T^3} = \frac{3}{c^2} (D + dD/d\lambda) / (2 \pi c)^2 \quad (3)$$

式中, λ 为信号波长, c 是光速。

输入的脉冲为超高斯脉冲,表达式为:

$$A(t) = \sqrt{P_0} \exp\left\{ - \ln 2 \cdot \left[2t / (rT_B) \right]^{2m} / 2 \right\} = \exp\left[- \left(t / T_0 \right)^{2m} / 2 \right] \quad (4)$$

这里取 $m = 1.436$, 其中 P_0 为脉冲的峰值功率, T_B 为码元周期, T_0 为脉冲强度下降到峰值 $1/e$ 时的半宽度, r 为占空比,是脉冲的极大值半宽和码元周期之比, $r = 1$ 为 NRZ 码。

Table 1 System parameters

	sing mode fiber (SMF)	dispersion compensation fiber (DCF)
amplifier span (km)	50	10
fiber dispersion (ps/ km ·nm)	+ 16	- 80
fiber dispersion slope (ps/ km ·nm ²)	+ 0.08	+ 0.08
fiber loss (dB/ km)	0.2	0.5
fiber nonlinearity factor (W ⁻¹ ·km ⁻¹)	1.31	5.24

在接收端,信号经过一个带宽为 B_0 的 F-P 腔光滤波器、平方检测器和一个电低通滤波器后再进行检测。我们这里取 $B_0 = 4R = 4 / T_B$, R 为信号的速率,电滤波器采用带宽为 $0.8R$ 二阶

Butterworth 滤波器。这里采用睁眼度代价法来表示光信号在传输过程中由于各种因数的影响所导致的性能恶化。系统睁眼度代价的定义为^[21]: $EOP = 10\log(a/b)$ (5) 式中, a 为输入信号功率的睁眼度代价, b 为经过系统传输后信号功率的睁眼度代价。

光纤放大器在对信号进行放大的同时,也加入了噪声,我们假定放大器的增益与信号的强度无关,其噪声主要是与信号无关的自发辐射噪声(ASE),噪声谱密度为 $N_{sp} h (G - 1)$,其中, N_{sp} 是光放大器的自发辐射噪声系数,这里取 $N_{sp} = 2$, h 为普朗克常数, ν 为信号的中心频率, G 为放大器的增益,它等于放大器跨度间的损耗。在模拟过程中,对放大器的处理在频域进行,对电场的每个频率分量乘以 \sqrt{G} ,再在其实部和虚部分别加上一个均值为 0、方差为 $N_{sp} h (G - 1) \cdot \Delta\nu / 2$ 的随机高斯变量,这里, $\Delta\nu$ 是离散的傅里叶频谱中每个傅里叶频谱所占有的带宽^[15]。

2 数值模拟结果

用分步傅里叶算法求解(1)式,模拟 40 Gb/s OTDM 信号在这几种补偿方案下的传输情况,在模拟中,采用的输入数据为 2^7-1 伪随机码序列。

首先看一下 NRZ 码的传输情况,图 2 给出了在这 4 种补偿方案中,产生 1 dB 的睁眼度代价时最大传输距离(为 SMF 和 DCF 的

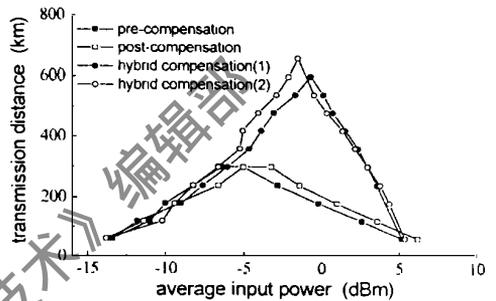


Fig. 2 Relation between max transmission distance and input power (NRZ code)

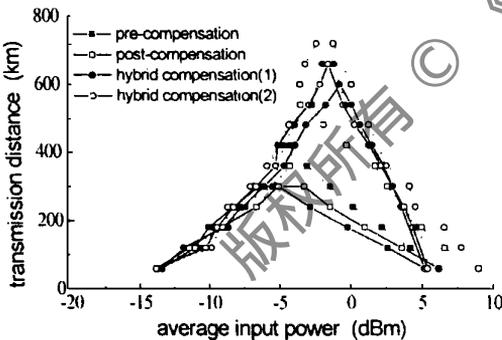


Fig. 3 Effect on capability of compensation scheme by non-linearity dispersion compensation fiber (NRZ code)

的性能产生了很大的不同。混合补偿可以有效地减小光纤非线性的影响,允许更大的输入功率,从而提高接收端的信噪比,所以,能够大大提高传输距离。这一点可从图 3 中看得很清楚,该图给出的是产生 1 dB 睁眼度代价时最大传输距离和平均输入功率的关系,其中的实线考虑了色散补偿光纤非线性的影响,虚线没有考虑色散补偿光纤非线性的影响。从该图可以看出,忽略色散补偿光纤的非线性对前补偿和后补偿方案的传输性能有很大的改善,而对混合补偿方案的性能改善不大,这说明混合补偿方案能有效地减小光纤非线性的影响。从图中还可以看出,由于放大器噪声和光纤的非线性共同作用,对于任何补偿方案,都存在一个最佳输入功率,采用混合补偿时的最佳输入功率比采用前补偿和后补偿大 4 ~ 5 dB。此外,图 2 还表明,考虑了各种因数的影响后,前补偿和后补偿、混合补偿 1 和混合补偿 2 可实现的最高传输距离

总长度)和光纤平均输入功率的关系。从图中可以看出,采用混合补偿方案的最大传输距离大大高于前补偿和后补偿方案,采用前补偿和后补偿时的最大传输距离为 300 km,而采用混合补偿方案 1 和方案 2 时的最大传输距离分别可达 600 km 和 660 km,提高了两倍。当输入功率较小时,系统性能的恶化主要由放大器的噪声决定,这几种补偿方案的性能都差不多,但当输入功率很大时,光纤中非线性效应对系统的性能起着决定作用,这几种补偿方案

之间虽然有些差别,但是差别不大。

混合补偿方案优于前补偿和后补偿方案可以从图4得到进一步解释。图4是在各种补偿方案下、单个脉冲在传输过程中脉冲宽度的变化和传输距离的关系,初始脉冲宽度为25ps,峰值功率为2mW,图中所示的曲线是在每个补偿单元后取样的结果。这里的一个补偿单元是指由一段SMF和一段DCF所组成的单元,前补偿单元是DCF在前、SMF在后,后补偿单元则相反,图1中的前补偿系统全部由前补偿单元组成,后补偿系统全部由后补偿单元组成,而混合补偿系统则是由前补偿和后补偿单元交替组成。在每个补偿单元的前半段,由于色散的影响,脉冲被展宽并产生啁啾,而在后半段的传输中,因为色散和前半段的色散相反,脉冲重新被压缩。由于光纤色散和非线性的共同影响,而且这种影响并不是简单的相加,所以,在经过每个补偿单元后,脉冲宽度并不能完全恢复。图4表明,脉冲经过一个前补偿单元后将会压缩,而经过一个后补偿单元后将会展宽,因此,在前补偿和后补偿方案中,这种效应很快积累起来,光纤非线性的影响很严重。而在混合补偿方案中,由于前补偿和后补偿单元对脉冲压缩和展宽的相反作用,脉冲在每经过两个补偿单元后得到很好的恢复,因此,大大减小了光纤非线性的影响,从而允许更大的输入功率和更长的传输距离。

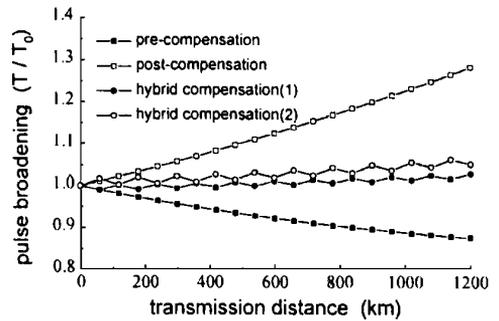


Fig. 4 Relation between pulse broadening and transmission distance

图5给出了各种补偿方案在RZ码情况下、产生1dB 睁眼度代价时的最大传输距离和平均输入功率的关系,图5的3个小图分别是占空比为0.5,0.25和0.125的结果。和上面讨论的NRZ码一样,采用混合补偿方式与前补偿和后补偿相比,可以成倍提高传输距离。该图表明,RZ码比NRZ码具有更好的传输性能,从图中可以看出,RZ码允许的输入功率比NRZ码大,而且随着占空比的增大,允许的输入功率越来越大,占空比 $r = 0.5, 0.25$ 和 0.125 时的最佳输入功率分别比NRZ码大1,2和4dB左右。这是因为40Gb/s的光脉冲在标准单模光纤中传输几公里后就被极大地展宽,相应地脉冲的峰值功率被大大降低,对于NRZ码来说,由于其脉冲宽度更窄,脉冲展宽更大,而且脉冲展宽随着占空比的增大而增大,因此,随着占空比的增大,脉冲在传输过程中的峰值功率将越来越小,这就减小了光纤非线性效应的影响,因而可以有更高的输入功率。

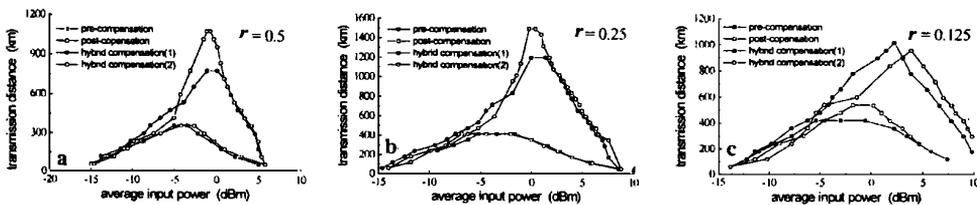


Fig. 5 Relation between max transmission distance and input power (RZ code)

更高的输入功率应该可以传输更长的距离,我们来具体看一看这几种RZ码的最大传输距离比NRZ码提高了多少。 $r = 0.5$ 时采用混合补偿方案的最大传输距离比NRZ码提高了约400km, $r = 0.25$ 时提高了约900km,但是 $r = 0.125$ 却只提高了400km,比 $r = 0.25$ 时还

小。这是由于光纤高阶色散影响的结果。随着占空比的增大,脉冲的宽度越来越窄,高阶色散的影响将越来越严重,图 6 给出了高阶色散对几种占空比信号的传输性能的影响,图中只给出了混合补偿方案的传输性能。从图中可以看出,高阶色散对占空比 $r = 0.5$ 和 $r = 0.25$ 的信号传输性能影响很小,可以忽略,但是它对 $r = 0.125$ 信号却有很大的影响,忽略高阶色散可以使最大传输距离提高 600 ~ 700km。从以上的分析可以得知,由于高阶色散的影响,这里存在一个最佳的占空比,它与信号的速率有关,信号的速率越大,最佳占空比将越大。从图中我们还可以看出,高阶色散对各种码型的最佳输入功率并没有影响,最佳输入功率只由光纤的非线性和放大器的噪声决定。此外,图 2 和图 5 还表明,混合补偿方案 2 的传输性能比混合补偿方案 1 有改善,但改善不是很大。

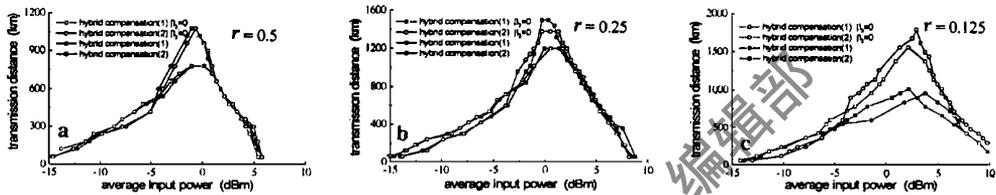


Fig. 6 Effect on transmission capability by higher order dispersion of fiber (RZ code)

3 结 论

通过上面对采用色散补偿光纤传输系统的性能分析和数值模拟,可以得到几点结论:(1)混合补偿方案可以大大减小光纤非线性效应的影响,与前补偿和后补偿方案相比,其最佳输入功率可以提高 4 ~ 5dB,从而大大提高信号的传输距离,和混合补偿方案 1 相比,混合补偿方案 2 的传输性能有些改善,但改善不是很大。(2)RZ 码比 NRZ 有更好的传输性能,随着占空比的增大,系统允许的最佳输入功率也相应增大,从而可以允许更大的传输距离,但是由于光纤高阶色散的影响,占空比并不是越大越好,这里存在一个最佳值,该最佳值与信号的速率有关。

参 考 文 献

- 1 Lin C, Kogelnik H, Coher L G. Opt Lett, 1980;5:476
- 2 Nake A, Saito S. J Lightwave Technol, 1995;13(5):862 ~ 867
- 3 Nuyts R J, Park Y K, Gallion P. J Lightwave Technol, 1997;15(1):31 ~ 42
- 4 Breuer D, Petermann K. IEEE Photon Technol Lett, 1997;9(3):398 ~ 400
- 5 Das C, Gaubnatz U, Gottwald E *et al.* Electron Lett, 1995;31(16):1374 ~ 1375
- 6 Artigaud S, Chbat M, Nouchi P *et al.* Electron Lett, 1996;32:1389
- 7 Lee W S, Garthe D, Pettitt G A *et al.* 40 Gbit/s TDM transmission over 160km (2 × 80km) of standard nondispersion-shifted fiber. OFC '97, Thc2, 1997:244 ~ 245
- 8 Ludwig R, Pieper W, Weber H G *et al.* Unrepeated 40 Gbit/s RZ single-channel transmission over 150km of standard fiber at 1.55μm. OFC '97, Thc 3, 1997:245 ~ 246
- 9 Breuer D, Ehrke H J, Köppers F *et al.* IEEE Photon Technol Lett, 1998;10(6):822 ~ 824
- 10 Alleston S B, Harper P, Penketh L S *et al.* Electron Lett, 1999;35(1):57 ~ 59
- 11 Agrawal G P 著, 胡国纬, 黄超译. 非线性光纤光学. 天津:天津大学出版社, 1992

作者简介:周志强,男,1965 年出生。讲师。主要从事光纤传输系统、数字电路设计与仿真的研究。