强度调制/直接检测(IM/DD)光纤通信系统的色散限制

宋 健* 范崇澄** 姚 彦*** 冯重熙**** (清华大学 北京 100084)

摘 要 本文讨论了光纤色散对 IM/DD 光纤通信系统再生中继距离的限制,导出了适用于各种 眼图恶化量、归一化脉宽和光源线宽展宽因子,且便于工程计算的 B²L 表达式。通过与其它理论的 比较、计算机仿真研究和对实际系统实验数据的分析,说明了该公式所得结论的正确性以及其它 结果的限制条件。

关键词 色散限制 光纤通信系统 归一化脉宽 眼图恶化量 线宽展宽因子

The Dispersion limitation on IM/DD Fiber Transmission Systems

Song Jian Fan Chongcheng Yao Yan Feng Chongxi (Tsinghua University Beijing 100084)

Abstract The dispersion limitation on the regeneration spacing of IM/DD fiber transmission systems is studied in this paper. A formula of B^2L for arbitrary eye opening penalty, normalized pulse width and source linewidth enhancement factor is derived. Results from our formula and computer simulation are compared with published data in the literature, which shows the correctness of our theory as well as the constraints of other results.

Key words dispersion limitation, optical fiber transmission system, normalized pulse width, eye opening penalty, source linewidth enhancement factor

1 引言

近年来,外调制器的使用可实现光源的高速低啁啾调制;波分复用(WDM)技术的采用能 有效地增加系统的容量;特别是 80 年代后期发展起来的 EDFA(掺铒光纤放大器)所带来的革 命性影响,使得强度调制/直接检测(IM/DD)成为当前光纤干线通信系统最重要的工作方式。 目前使用 EDFA 的全光中继通信系统指标已达到单路 10Gb/s 9000km^[1]和两路 5Gb/s 4500km^[2],而 2.5Gb/s IM/DD 系统(外调制)的接收灵敏度已好于同速率的相干 CPFSK 系 统^[3]。

*** 冯重熙 清华大学教授 博士生导师

^{*} 宋 健 清华大学博士 讲师

^{**} 范崇澄 清华大学教授 博士生导师

^{***} 姚 彦 清华大学教授 博士生导师

(2)

IM/DD系统再生中继距离受光纤损耗、色散和非线性三个方面的限制。其中光纤损耗在 很大程度上可为级联 EDFA 所抵消(此时 EDFA 中放大自发辐射的积累将导致系统信噪比下降,使系统总传输距离受到限制,因此用级联 EDFA 抵消光纤损耗的能力是有限的),而非线 性限制一般在再生距离千公里以上和/或使用 WDM 时才变得严重起来,故色散限制是决定 许多光纤通信系统再生中继距离最重要的限制。

通常用系统中码率 B 的平方与系统再生中继距离 L 的乘积 B²L 描述色散对 IM/DD 系统 的限制。不少文献[4]~[8]都对此进行了讨论,但这些结果及其适用条件差异甚大,实际应用 甚为不便。例如:当系统中使用 EDFA 后,其工作波长必然在 1.55μm 波段,此时常规单模光 纤(零色散波长为 1.31μm 左右)的色散系数 D 高达 15~20ps/km・nm,能否用于 2.5Gb/s 下 近 km 的无再生中继传输成为敷设光纤之前必须慎重考虑的问题。然而,各理论对此问题的回 答恰在可^{[7]~[8]}、否^{[5]~[6]}之间。因而有必要对色散限制进行深入的理论分析,给出适合于各种 实用条件的、统一的理论结果,并通过比较给出各已有理论的适用范围。

本文以眼图恶化量为判据,导出了一个适用于各种眼图恶化量、归一化脉宽和线宽展宽因子,且便于工程化设计的 B²L 的计算公式。通过仿真计算和对照已发表的各种结果,说明了本 公式的正确性和各理论的适用条件。

2 色散限制的理论推导

2.1 系统模型及有关假设

分析时采用的系统模型如图1所示:

其中:S_m(t)是经光源调制后的归一化强度输出,其傅立叶变换为 S_m(ω);H(ω)是光纤的频域 冲激响应函数;S_{out}(t)是光接收机的归一化电输 出,其傅立叶变换为 S_{out}(ω)。

假设:





(1) 光源工作在大信号、高消光比、深度调制状态下。这是系统中光源通常的工作情况, 此时光源啁啾(chirp)主要是瞬态啁啾^[9],从而: $\omega(t) = \omega_0 + \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{d\ln S_{in}(t)}{dt}$;

(2) 在光纤输入端的光脉冲为高斯形: $S_{in}(t) = \exp(-t^2/T_{in}^2)$,其中 T_{in} 为光强降为最大值 1/e 时的脉冲半宽;

(3) 光纤为一无损线性网络: $H(\omega)$ 可表示为: $H(\omega) = \exp[-j\beta(\omega)L]$ 其中:L 为光纤的长度, ω 为光的角频率。

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \beta'_0(\omega - \omega_0) + \frac{\beta''_0}{2}(\omega - \omega_0)^2$$
$$\beta''_0 = -\frac{\lambda^2 D}{2\pi c}$$

这里 λ 为光源中心波长,ω, 为 λ 对应的角频率,C 是真空中的光速。

2.2 推导及分析

由附录的推导可得

$$S_{\rm out}(t) = \frac{T_{\rm in}}{T_{\rm out}} \exp(-t^2/T_{\rm out}^2) = \frac{1}{q} \exp[-t^2/(qT_{\rm in})^2]$$
(1)

其中: $T_{\text{out}}^2 = [(T_{\text{in}}^2 - \alpha \beta''_0 L)^2 + (\beta''_0 L)^2]/T_{\text{in}}^2$

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cn

 $q=T_{out}/T_{in}$ 为脉冲的相对展宽因子。

式(2)中方括号内第一项反映了线性啁啾的影响:使光脉冲谱宽变为原来的 $\sqrt{1+\alpha^2}$ 倍, α 为线宽展宽因子。第二项给出了脉冲的本征展宽:即未受啁啾影响的光脉冲通过光纤时,色散带来的影响。由式(2)中可以看出: $\alpha\beta^{\prime\prime}$ 。<0时,光脉冲将连续展宽;反之,光脉冲在光纤传输过程中先被压缩而后展宽。

Hagimoto^[7]已经指出,传输特性(如眼图)恶化与码元周期 Δt_{in} 有关,但实际是 $\Delta t_{in}/T_{in}$ 在 B²L 中起作用。因此我们引入归一化脉宽参数 P,令 P= $\Delta t_{in}/T_{in}$,码率 B=1/ Δt_{m} =1/PT_{in},由 式(2)可得:

$$B^{2}L = \begin{cases} \frac{2\pi}{P^{2}} \cdot \frac{\sqrt{q^{2}\alpha^{2} + q^{2} - 1} - \alpha}{1 + \alpha^{2}} \cdot \frac{c}{\lambda^{2}|D|} & (D > 0) \\ \frac{2\pi}{P^{2}} \cdot \frac{\sqrt{q^{2}\alpha^{2} + q^{2} - 1} + \alpha}{1 + \alpha^{2}} \cdot \frac{c}{\lambda^{2}|D|} & (D < 0) \end{cases}$$
(3)

式中若 P^2 选取得过小,光纤入端的眼图会变坏;而 P^2 过大,光脉冲将变成某种形式的归零码,从而限制了码率 B_0 本文中选取 P^2 的典型值为 $4\ln 2$ 、4、 $8\ln 2$ 和 8,对应于码元周期 Δt_n 分别取为高斯脉冲降为最大值 1/2、 e^{-1} 、1/4 和 e^{-2} 时的时间间隔。另一方面,q 是归一化脉宽 P和给定眼图恶化量 X(dB)的函数,并由下式确定:

$$X = 101g \left[\frac{q(1-2\sum_{k=1}^{\infty} e^{-(kP)^2})}{1-2\sum_{k=1}^{\infty} e^{-(kP/q)^2}} \right]$$

式中分子、分母分别对应于光纤传输前后信号的眼皮最大开启度。通常认为 K=5 时结果已足 够精确。以下分析中仅考虑光纤色散系数 D>0 的情况。

与式(3)相比,Hagimoto^[7]等人的结果相当于 $P^2 = 4\ln 2$,q = 1.2时的特例,故本结果可看成是 Hagimoto 等人结果的广义化。从式(3)可看到,给定眼图恶化量下,B²L 随着相对脉冲展宽因子 q 而增加:此时允许脉冲展得更宽,当 a 不变时光纤长度 L 可以加长,使 B²L 变大;P 增加则意味着码率 B 降低,使 B²L 减小。我们认为 P^2 的取值在 8ln2 左右为宜。

利用公式(3)-(4),能方便地得到给定 P,X,α 下的 B²L 值。衡量系统性能时眼图恶化量 是一个经常提及的重要指标,当系统误码率比较低($<10^{-9}$)、即信噪比较高时,可以认为信道 不理想的影响将远大于噪声的影响。此时眼图恶化、色散恶化和功率恶化的数值近似相等。考 虑到系统的实际情况,我们给出了 $\alpha = -1^{[10]}$ 和 0(外调制器)、 $\alpha = 0.5$ (电吸收调制器)和 $\alpha = 5$ (直接调制)时,不同归一化脉宽 P下的 γ 与 q 的关系曲线(图 2),这里 γ 按 $B^2L = \gamma \frac{c}{|D|\lambda^2}$ 定 义,文献中经常遇到。例如对常规单模光纤,文献[9]、[11]中引用的 B²L \approx 6000(Gb/s)²·km, 对应于 $\gamma = 0.79$;而通过公式(3)-(4),在 $P^2 = 8\ln 2, \alpha = 0, D = 17 \text{ps/km} \cdot \text{nm}$ 眼图恶化量为 1dB 时的计算结果为: $q = 1.21, \gamma = 0.78$ 。这表明本论文得到的计算公式对实际系统中光纤色 散限制的情况近似得较好。据此可以认为:当码率 B=2.5Gb/s,应用外调制技术($\alpha \approx 0$)时、 IM/DD 常规单模光纤通信系统的最大再生中继距离接近 1000km,这一距离基本可以满足我 国大城市间通信距离的要求。因此完全能够使用已敷设的常规单模光纤系统传输 2.5Gb/s 速 率的信号,并采用 WDM 技术以解决目前我国面临的长途干线扩容问题。

3 计算机仿真

以数字信号处理与计算机技术为基础的计算机仿真技术提供了一个比纯理论分析更加符 (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cn



图 2 不同归一化脉宽 P 下 Y 与 q 的关系

合实际情况,比实验研究更能突出主要矛盾、省时省力的新研究手段。目前为不少研究者采用 对系统进行特性分析和优化设计^{[9].[12]~[14]}。

为进一步讨论色散限制对 IM/DD 光纤通信系统的影响,我们利用计算机仿真技术进行 了实际系统的模拟。图 3 为仿真系统框图。

使用这个仿真软件,我们模拟了 2.5Gb/s 码率下系统的传输特性,为比较方便起见,将所 得结果与其他文献[4]~[9]、[12]~[14]的结果都画于图 4 中,标有(CS)字样者为计算机仿 真的结果,点 A 和曲线 E 为我们的结果。图 4 表明:包括 Elrefaie^[12]、Vodhanel^[13]和本文作者 所得的仿真结果十分接近,这是各个研究者采用了近乎相同的仿真系统模型和结构的缘故。

4 比较与分析

从图 4 不难看出,理论分析的结果差异很明显,这是各个研究者分析时选取的色散限制判据不同的结果。

Henry^[5]和 Miller^[6]的分析结果是考虑了最坏情况下的结果。此时输入的码元不再是随机 序列,而是 1010...的周期信号,该信号的功率主要集中在 $\omega = \pi B \ \Omega(B \ D)$ 两率)附近,他们讨 论的是光纤色散对 $\pi B \ D$ 量功率的影响,故所得结论显得保守($\gamma = 0.5$)。

Hagimoto^[7]、Nakazawa^[8]等人的结果,是以光脉冲的半高全宽为码元周期(即 $P^2 = 4\ln 2$), 且仅给出了 q = 1.2 时的结果而没有眼图恶化量的分析。选择 $P^2 = 4\ln 2$ 固然能使 B^2L 增大,但 此时光纤入端的光脉冲的眼皮最大开启度将会恶化。



图 3 仿真系统框图

图 4 各种文献所发表结论

Koyama^[4]等人的理论曲线目前常被引用,他们选定 $1/2T_{out}$ 为码率 B,这样曲线上各点 q 的值与 α 有关,且未进行眼图恶化量的分析。由于该结果是把 α 包含于 q 中,故曲线上各点的 眼图恶化量不同,不便于系统设计时使用。本文结果则将 q 与 α 变成了影响 B²L 的两个独立因 素,克服了这一缺点。理论分析曲线 E 为利用式(3)在 X = 1dB、 $P^2 = 8$ ln2 时的计算结果。与 Koyama^[4]等人的曲线相比,除 $\alpha \approx 0$ 外均明显不同,说明以眼图恶化 1dB 为判据时,除外调制 情况,本文得到的 B²L 的限制均严于 Koyama 的结果。

文献[15]给出的实验系统中,B=2.5Gb/s, α =-1,X=0.6dB时的 γ =0.91。对照图 2(a)可知该实验结果与 P^2 =8的曲线是十分接近的。考虑到消光比不理想等因素的影响,预计理想时的 γ 值还应大些,将位于 P^2 =8ln2 曲线附近。通过上述分析,可以认为我们所给出的工程化的计算公式基本上反映了色散对 IM/DD 光纤通信系统的影响。

5 结论

本文导出了给定眼图恶化量 X、归一化脉冲宽度 P 和光源线宽展宽因子 a 下的 B²L 的工程化的计算公式。通过同其它文献结果的比较、利用计算机仿真手段和对照实际系统的实验数据,对该公式给出的结论进行了验证,结果表明该公式与系统的实际情况非常接近,完全能够满足精度的要求。

参考文献

- 1 Taga H. Edagawa N, Tanaka H, et al. 10Gb/s, 9,000km IM-DD transmission experiment using 274 Er-doped fiber amplifier repeaters. In:OFC'93, PD1, 1993
- 2 Taga H, Edagawa N, Yamamoto, S et al. Over 4,500km IMDD.2-channel WDM transmission experiment at 5Gb/s using 138 In-line Er-doped fiber amplifiers. In:OFC'93, PD4, 1993
- 3 Park Y K. Long distance transmission with Erbium-doped fiber amplifier in direct and coherent detection system. In: ECOC-IOOC'91, 1991, 87
- 4 Koyama F, Suematsu Y. Analysis of dynamic spectral width of dynamic-single-mode(DSM)lasers and related transmission bandwidth of single-mode-fiber. J-QE, 1985, 21(4):292
- 5 Henry P S. Lightwave primer. JQE, 1985, 21(12);1862

- 6 Miller S E, Kaminow I. Optical Fiber Telecommunications I, Academic Press. 1988, 808
- 7 Hagimoto K Aida K. Multigigabit-per-second optical baseband transmission system. JLT, 1988. 6(11):1678
- 8 Nakazawa K. Nishi S, Aida K. Yomeda E. Trunk and distributed network applications of erbium-doped fiber amplifier. ibid, 1991, 9(2):198
- 9 Corvini P J, Koch T L. Computer simulation of high-bit-rate optical fiber transmission using single-frequency lasers. ibid, 1987, 5(11),1591
- 10 Jopson R M, Gnauck A H, Derosier R M. 10Gb/s 360km transmission over normal-dispersion fiber using mid-system spectral inversion. OFC'93, PD3, 1993
- 11 Gnauck A H, Giles C R, Cimini Jr L J, et al. 8 Gb/s-130km transmission experiment using Er-doped fiber preamplifier and optical dispersion equalization. ECOC-IOOC'91, WeC7-4, 1991
- 12 Elrefaie A F, Wagner R E, Atlas D A, et al. Chromatic dispersion limitations in coherent lightwave transmission systems. JLT, 1988, 6(5):704
- 13 Vodhanel R S, Elrefaie A F, Iqbal M Z, et al. Performance of directly modulated DFB lasers in 10Gb/s ASK, FSK and DPSK lightwave systems. ibid, 1990, 8(9):1379
- 14 Atlas D A, Elrefaie A F, Romeiser M B, *et al.* Chromatic dispersion limitations due to semiconductor laser chirping in conventional and dispersion-shifted single-mode fiber systems. Opt. Lett, 1988, 13(11),1035
- 15 Kao M L, Park Y K, Nguyen T V, et al. 2.5Gb/s Ti;LiNbO3 external modulator transmitter and its long distance transmission performance in the field. electron. Lett, 1992, 28;687

附录

光源的光强输出 $S_{\rm m}(t)$ 为: $S_{\rm cm}(t) = \exp(-t^2/T_{\rm in}^2)$ 瞬时频率 $\omega(t)$ 为: $\omega(t) = \omega_0 + \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{\mathrm{dln}S_{\rm in}(t)}{\mathrm{d}t} = \omega_0 - \frac{\alpha t}{T_{\rm cm}^2}$

则输入光纤的光脉冲信号的光场 E_u(t)为:

$$E_{\rm in}(t) = \sqrt{S_{\rm in}(t)} \cdot \exp[j \int_0^t \omega(t') dt'] = \exp[-\frac{(1+j\alpha)t^2}{2T_{\rm in}^2}] \cdot \exp(j\omega_0 t)$$

其傅立叶变换 E_m(ω)为

$$E_{\rm in}(\omega) = \int E_{\rm in}(t) \cdot \exp(-j\omega t) dt = \sqrt{\frac{2\pi}{1+j\alpha}} \cdot T_{\rm in} \cdot \exp[-\frac{(\omega-\omega_0)^2 T_{\rm in}^2}{2(1+j\alpha)}]$$

经过长度为L的光纤传输、到达光接收机的光场 E_{nu}(t)为 E_{lu}(ω) • H(ω)的傅立叶反变换:

$$E_{out}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_{out}(\omega) \cdot \exp(j\omega t) d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_{in}(\omega) H(\omega) \cdot \exp(j\omega t) d\omega$$
$$= T_{in} \cdot \sqrt{\frac{1}{2[T_{in}^2 - \alpha\beta''_0L + j\beta''_0L]}} \cdot \exp[j(\omega_0 t - \beta_0 L)].$$
$$\exp[-(t - \beta'_0 L)^2/2(\frac{T_{in}^2}{1 + j\alpha} + j\beta''_0 L)]$$

经平方律检波后的输出 Som(t)为:

$$S_{\text{out}}(t) = |E_{\text{out}}(t)|^{2} = \frac{T_{\text{in}}^{2}}{\sqrt{(T_{\text{in}}^{2} - \alpha\beta^{n}{}_{0}L)^{2} + (\beta^{n}{}_{0}L)^{2}}}$$

$$\exp\{-(t - \beta^{n}{}_{0}L)^{2}T_{\text{in}}^{2}/[(T_{\text{in}}^{2} - \alpha\beta^{n}{}_{0}L)^{2} + (\beta^{n}{}_{0}L)^{2}]\}$$

$$= \frac{T_{\text{in}}}{T_{\text{out}}}\exp(-t^{2}/T_{\text{out}}^{2}) = \frac{1}{q}\exp[-t^{2}/(qT_{\text{in}})^{2}]$$
(1002 (ii + 11 + 0) U if

(1993年4月19日收到,1995年10月改定)

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cn