

海底系统的偏振模色散研究

邓大鹏¹, 于俊婷¹, 何宏业², 盛 兴¹

(1. 解放军西安通信学院, 陕西 西安 710106; 2. 解放军外国语学院, 河南 洛阳 471003)

摘要: 由于海底应用环境复杂, 海底光缆会受到海水的压力、冲击和暗流等作用, 具有随机性的偏振模色散(PMD)成为系统极限传输的限制因素。文章对横向应力、弯曲等外界因素对 PMD 的影响进行了理论分析, 根据海底光缆的实际工作情况, 模拟 4×2.5 Gbit/s 系统取 3 dB 的功率冗余度, 进行了 PMD 仿真, 得出系统正常工作时 PMD 系数不超过 $1.8 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ 的结论。为避免 PMD 补偿, 当弯曲半径为 0.3 m 时, 要求横向应力不得大于 8.9 N/m 。

关键词: 应力; 弯曲; 偏振模色散; 双折射

中图分类号: TN818

文献标识码: A

文章编号: 1005-8788(2010)04-0046-03

Study on polarization mode dispersion in submarine transmission systems

Deng Dapeng¹, Yu Juntong¹, He Hongye², Sheng Xing¹

(1. PLA Xi'an Communications Institute, Xi'an 710106, China;

2. PLA University of Foreign Languages, Luoyang 471003, China)

Abstract: As submarine cables applied in usually complicated environment are subject to water pressure, impact and subterranean flow, the resulted stochastic Polarization Mode Dispersion (PMD) has become a limiting factor for the system extreme transmission. In this paper, the effects of such external factors as lateral stress and bending on PMD are theoretically analyzed and simulation of the 4×2.5 Gbit/s communication system is performed in accordance with the actual work conditions of the cable, taking 3 dB as the power redundancy. Simulation results show that when the communication system works normally, the PMD coefficient does not exceed $1.8 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$. In order to avoid PMD compensation, the lateral stress is not to be greater than 8.9 N/m when the bending radius is 0.3 m.

Key words: stress; bending; Polarization Mode Dispersion (PMD); birefringence

0 引 言

在海底传输系统中, 光纤的衰减、色散以及非线性依旧是限制系统性能的主要因素。掺铒光纤放大器(EDFA)弥补了因衰减造成的功率损耗; 色散管理技术使得色散与非线性相互制约, 相互影响, 使得得以减小或消除。然而, 由于海底应用环境极其复杂, 海缆会受到海水的压力、冲击和暗流等各种因素的影响, 从而引起海缆中光纤的横向应力、弯曲半径等发生变化, 使得偏振模色散(PMD)随机变化难以补偿, 成为限制系统极限传输的重要因素之一, 最终使信号脉冲失真, 增大光通道代价。

1 PMD 的理论分析

理想光纤的横截面是圆对称的, 沿纵向是均匀的。而实际光纤的横截面具有一定的椭圆度, 沿纵向也存在随机性。在单模光纤中, 基模 HE_{11} 含有两个相互正交的本征模 HE_{11x} 和 HE_{11y} , 由于其折射率不同, 在传输过程中出现了传播常数差, 即 $\beta_x \neq \beta_y$, 这时光纤中出现双折射现象。定义光的双折射为^[1]

$$\Delta\beta = \beta_x - \beta_y = 2\pi n_x/\lambda - 2\pi n_y/\lambda = 2\pi(n_x - n_y)/\lambda = 2\pi\Delta n/\lambda, \quad (1)$$

式中, λ 为真空中的波长; Δn 为光纤截面上有效折射率的差。对于一般的石英玻璃, 单位长度的群时延差(DGD)可近似为^[2]

$$\Delta\tau_p \approx (n_x - n_y)/c, \quad (2)$$

式中, c 为真空中的光速。

当光纤长度 $L \gg L_c$ (L_c 为耦合长度) 时, PMD 为^[3]

$$\Delta\tau_{\text{rms}} = \frac{d(\Delta\beta)}{d\omega} \cdot \sqrt{2LL_c} = \Delta\tau_p \cdot \sqrt{2LL_c} = \frac{\Delta n}{c} \cdot \sqrt{2LL_c}, \quad (3)$$

式中, ω 为角频率。

和色度色散一样, PMD 会导致脉冲展宽和畸变, 引起码间干扰, 使系统误码率增大。但 PMD 是随机变化的, 在光纤的生产、成缆和光缆敷设等过程中, 都不可避免地使光纤呈现几何椭圆度、残存或承受应力(本征或非本征的)和弯曲等, 因此, 研究弯曲和应力对 PMD 的影响非常必要。

2 弯曲和应力对光纤双折射的影响

2.1 横向应力对双折射的影响

假设对长度为 L 的光纤施加沿纵向均匀分布的、大小为 F 的横向应力，则沿 x 和 y 偏振方向有效折射率改变为^[4~5]

$$\Delta n = (\Delta n_{\text{eff}})_y - (\Delta n_{\text{eff}})_x = \frac{n_0^3}{2E}(1+\nu)(p_{12} - p_{11})\Delta\sigma, \quad (4)$$

式中， n_0 为光纤平均折射率； E 和 ν 分别为光纤的杨氏模量和泊松系数； p_{11} 和 p_{12} 为弹光张量系数； $\Delta\sigma = \sigma_x - \sigma_y$ 为横截面两正交方向受到的应力之差， σ_x 和 σ_y 分别为光纤在 x 和 y 方向的应力。石英光纤典型取值为 $n_0 = 1.46$ 、 $E = 6.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 、 $\nu = 0.17$ 、 $p_{11} = 0.121$ 和 $p_{12} = 0.270$ 。

因为外力沿光纤长度方向是均匀分布的，且单模光纤纤芯直径只有 $8 \sim 9 \mu\text{m}$ ，所以可近似认为纤芯中应力均匀，则在光纤横截面上任一点的应力为^[5]

$$\sigma_x = F/(rL\pi), \quad \sigma_y = -3F/(rL\pi),$$

式中， r 表示光纤包层半径。

因此，可以得到光纤纤芯有效折射率改变的最终表达形式为

$$\Delta n = \frac{n_0^3}{2E}(1+\nu)(p_{12} - p_{11})\Delta\sigma = \frac{n_0^3}{2E}(1+\nu)(p_{12} - p_{11})\frac{4F}{rL\pi}. \quad (5)$$

由此可得，横向应力引起的归一化双折射为

$$B_F = \frac{n_0^2}{2E}(1+\nu)(p_{12} - p_{11})\frac{4F}{rL\pi} = 3.63 \times 10^{-12} \frac{F}{rL}. \quad (6)$$

2.2 弯曲对双折射的影响

假设光纤是理想的单模光纤，内部不存在固有双折射，光纤包层半径为 r ；而且光纤只发生弯曲而内部没有张力，弯曲半径为 R ，且有 $R \gg r$ ，则在光纤横截面上面元 $dx dy$ 处的应力差可表示为^[5]

$$\Delta\sigma = \sigma_y - \sigma_x = \frac{C_1}{2} = \frac{r^2 E}{2R^2},$$

代入式(4)，即可得到由弯曲引起的双折射：

$$\Delta n = \frac{n_0^3}{4}(1+\nu)(p_{12} - p_{11})\left(\frac{r}{R}\right)^2, \quad (7)$$

由此可得，弯曲引起的归一化双折射为

$$B_R = \frac{n_0^2}{4}(1+\nu)(p_{12} - p_{11})\left(\frac{r}{R}\right)^2 = 0.093\left(\frac{r}{R}\right)^2. \quad (8)$$

忽略应力和弯曲的相互干扰，它们引起的归一化双折射可以近似表示为^[1]

$$B = B_F + B_R = 3.63 \times 10^{-12} \frac{f}{r} + 0.093\left(\frac{r}{R}\right)^2, \quad (9)$$

式中， $f = F/L$ 为单位长度的光纤所受的横向应力。

结合式(3)、(9)可得，应用到实际系统之中时应力和弯曲引起的 DGD 为

$$\Delta\tau_{\text{外}} = \frac{n}{c} \left[3.63 \times 10^{-12} \frac{f}{r} + 0.093\left(\frac{r}{R}\right)^2 \right] \sqrt{2LL_c}. \quad (10)$$

引起 PMD 的内在因素是光缆出厂时就已经确定的，实际应用中无法改变，参照商用化单模光纤的设计参数，选取 PMD 系数为 $0.04 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ ，因此，传输距离为 468 km 时，系统本征双折射引起的 PMD 为 0.865 ps 。取常规单模光纤的外径为 $125 \mu\text{m}$ ，相关长度为 100 m ，系统中横向应力和弯曲导致的 DGD 变化如图 1 所示。

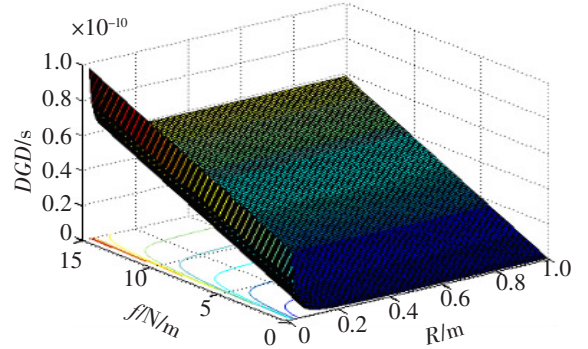


图 1 DGD 随横向应力与弯曲半径的变化图

由图可知，随着横向应力的增大，弯曲半径的减小，PMD 导致的 DGD 呈递增的趋势。

3 仿真结果

以 $4 \times 2.5 \text{ Gbit/s}$ 系统为例，仿真结构的基本构成如图 2 所示，由光发射机单元、光纤传输链路和

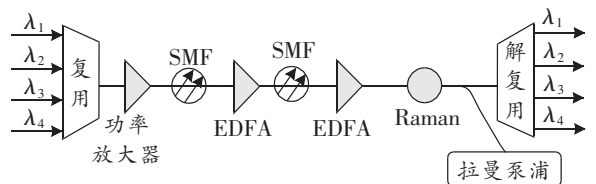


图 2 $4 \times 2.5 \text{ Gbit/s}$ 系统仿真结构图

光接收机单元组成。入纤功率设定为 17.233 dBm ，光纤线路由 3 段光纤组成，长度分别为 75 、 280 和 113 km ，光纤损耗为 0.2 dB/km ，信道间隔为 200 GHz ，入射波长分别为 1550.12 、 $1551.$

72, 1 553.32 和 1 554.92 nm。

在其他各项因素不变的情况下,在 0~2.5 的范围内改变 PMD 系数,得到系统的误码率和系统冗余度随 PMD 系数变化的曲线,如图 3 所示。

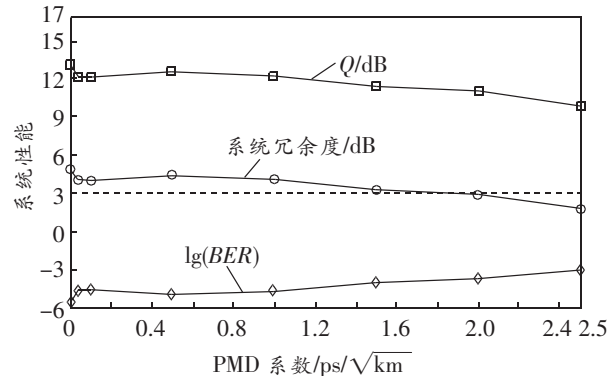


图 3 系统性能与 PMD 系数之间的关系

考虑到仿真过程无法模拟实际环境中的种种随机影响因素,在仿真过程中,当系统冗余度低于 3 dB 时视为系统无法正常运行。由图 3 分析可知,随着 PMD 系数的增大,系统性能恶化,但由于系统传输速率较低,误码率整体的变化范围不大。当不考虑 PMD 时,系统性能最好,此时只有色度色散引起脉冲展宽,并与非线性相互作用。当 PMD 系数在 0.1~0.5 的范围内变化时,由于 PMD 的存在使得脉冲展宽,减弱了非线性造成的影响,误码率呈下降趋势;而当 PMD 系数继续增大时,脉冲展宽严重,使得误码率升高。当 PMD 系数达到 1.8 ps/√km 时,系统冗余度低于 3 dB,系统无法正常运行。此时,系统由于 PMD 产生的 DGD 为 38.94 ps,这与理论分析相吻合。

由本征双折射引起的 DGD 为 0.865 ps,因此,系统由于外界因素影响产生的 PMD 不得高于 38 ps。为了更进一步说明横向应力与弯曲对 PMD 的影响,进而影响系统性能,模拟得到当 PMD 系数不超过 1.8 ps/√km 时,横向应力和弯曲半径所能达到的范围为图 4 中曲线下方的区域。

从图中曲线可以看出,随着 PMD 系数的增大,系统所能承受的横向应力逐渐减小。当弯曲半径 < 0.3 m 时,系统所能承受的横向应力随着弯曲半径的增大而急剧增大。当弯曲半径 > 0.3 m 时,横向应力随着弯曲半径的增大基本不再变化,此时横向应力引起的双折射起决定作用。由此可以得

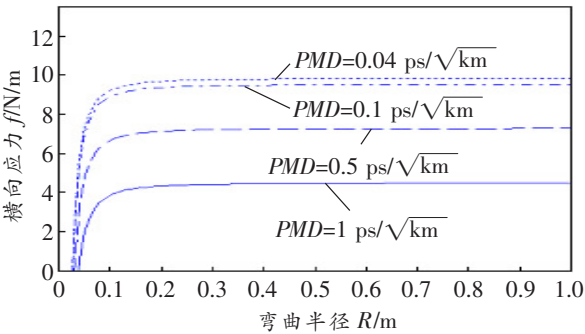


图 4 系统所能承受的横向应力与弯曲半径的范围

出,当 PMD 系数选择 0.04 ps/√km,为确保系统不受 PMD 的影响,同时免除对 PMD 的补偿,横向应力及弯曲半径的取值应该在曲线下方的范围。例如,当弯曲半径为 0.3 m 时,要求横向应力 ≤ 8.9 N/m。

4 结束语

海底系统中光缆经常会受到海水的冲击以及暗流等环境因素的影响,PMD 随机性较强,难以得到补偿,成为系统传输的主要限制因素之一。虽然传输速率为 2.5 Gbit/s 的系统在陆地应用时 PMD 的影响可以忽略不计,但当光缆应用于海底时,其周围环境温度、横向压力和弯曲等恶劣环境都会使 PMD 对系统产生很大的影响,因此必须通过对海缆的合理设计,使缆中光纤受到的横向压力和弯曲半径不超过允许范围,从而降低 PMD 对系统的影响。然而这些只是理论上的分析仿真,与实际应用有一定的差距;而且 PMD 具有随机性,实际施工过程中还需实地、现场对其进行测量。

参考文献:

[1] 刘开贤. 光纤通信系统中的偏振模色散及相关问题的研究 [D]. 北京:北京邮电大学,2004.
[2] 孙学明. 高速光纤通信系统中偏振模色散的研究 [D]. 北京:北京邮电大学,2004.
[3] 顾晓仪. WDM 超长距离光传输技术 [M]. 北京:北京邮电大学出版社,2005.
[4] Jeunhomme L B(著),周洋溢(译). 单模纤维光学原理与应用 [M]. 桂林:广西师范大学出版社,1988.
[5] Gafsi R, El-Sherif M-A. Analysis of induced-birefringence effects on fiber Bragg gratings [J]. Optical Fiber Technology, 2000,(6):299-323.