

基于二阶 PMD 补偿方案的研究

张 文,孙山林

(桂林航天工业高等专科学校,广西 桂林 541004)

摘要:偏振模色散(PMD)是对高速长距离光纤传输系统影响较大的一个因素,文章论述了 PMD 对光纤通信系统的影响,建立了光纤通信系统中 PMD 影响的理论模型,在分析单通道一阶补偿方法的局限性的同时,对高阶 PMD 及其补偿问题进行了分析与讨论,提出了二阶 PMD 补偿方案,并对该方案进行了研究。

关键词:偏振模色散;主偏振态;补偿

中图分类号:TN915

文献标志码:A

文章编号:1005-8788(2007)05-0021-02

Study on 2nd-order PMD-based compensation method

Zhang Wen, Sun Shanlin

(Guilin College of Aerospace Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Polarization Mode Dispersion (PMD) is one of the factors that has fairly large impacts on high-speed long-haul fiber-optic transmission systems. This article expounds the influences of PMD on the fiber-optic communication system, establishes the theoretical model, analyzes and discusses the higher-order PMD and its compensation while analyzing the limitations of the single channel 1st-order compensation method, presents 2nd-order PMD compensation method and conducts the research on this method.

Key words: PMD;PSP;compensation

1 PMD 概念与机理

理论上讲,传输光信号的单模光纤应该是均匀圆柱形光波导载体,从光纤横截面上看到的应是一组同心圆。然而,受光纤生产过程中环境、工艺、精度和控制流程等因素的制约,成品光纤并非严格意义上的圆柱形均匀光波导,而是具有椭圆形特征。对于在给定时间和光频上应用的单模光纤,总存在两个称之为主偏振态(PSP)的正交偏振态。若单模光纤结构为完全轴对称(圆均匀),则这两个 PSP 在光纤中以相同群速度传播;若轴不对称(椭圆)或受到外界因素的影响,两个 PSP 则以不同的群速度传播。在传输速度上形成快轴和慢轴,结果是两个相互正交的主偏振模到达光纤对端时,两正交偏振模产生不同群时延,这种现象通常称作偏振模色散(PMD),用差分群时延(DGD)表示。

产生 PMD 的原因很多,有光纤生产工艺和结构所决定的本征因素,也有外部环境等决定的非本征因素。本征因素包括纤芯不圆度、残余应力以及材料热膨胀系数不一致导致的轴不对称等;非本征因素包括外磁场、温度、弯曲、成缆和敷设过程中残余的应力、随机应力、弯曲、扭绞、振动及老化等不确定因素。众多因素作用的结果,对光纤形成了随机扰动,引起光纤正交模的明显模耦合。研究表明,

PMD 的产生是一个随机和随时变化的过程,任意一段光纤的 PMD 是一个服从 Maxwell 速率分布函数的随机变量,其瞬时 PMD 值随波长、时间、温度和安装条件而变化,所以对 PMD 测量只能以统计值为基础。

2 PMD 对光纤通信系统的影响

当技术上逐步解决了损耗和色度色散的问题后,在光纤通信系统传输速率越来越高、无中继传输距离越来越长的情况下,PMD 成了影响光纤通信系统性能的主要因素。在数字系统中 PMD 会引起脉冲展宽,使高速系统容易产生误码,限制了光纤波长带宽的使用和光信号的传输距离,在 CATV 等模拟系统中则会引起信号失真。在实际应用的光纤中,双折射较小,外部因素比内部因素对光纤的影响大,会对光纤形成随机扰动,引起光纤正交模的明显模耦合,两个偏振模呈强耦合状态。ITU-T 建议 G.652 和 G.655 中规定,光纤 PMD 的数值不能 $>0.5 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$,如果以此系数为基本 PMD 计算阈值,且以 PMD 的功率代价为 1 dB 来计算,则 10 Gbit/s 信号无电中继的最大传输距离为 400 km,而 40 Gbit/s 信号无电中继的最大传输距离仅为 25 km。当单通道信号速率达到 40 Gbit/s 时,由于带宽的增加使得 PMD 效应非常明显。因此在目前

收稿日期:2007-02-25

作者简介:张文(1966-),男,江苏连云港人,高级工程师,中国通信学会高级会员,中国计算机学会高级会员,主要研究方向为网络管理、计算机通信。

的实用化系统向高速和长距离系统发展的过程中，PMD 的带宽自适应补偿是波分复用(WDM)及密集波分复用(DWDM)系统急需解决的关键技术问题之一。

3 PMD 补偿方案的研究

3.1 单通道一阶 PMD 补偿器对 PMD 补偿作用的局限性

目前，一阶 PMD 补偿器已经实用化，但高阶补偿还不成熟。所谓一阶补偿方法是指当光纤的偏振相关损耗(PDL)忽略不计，在一定时间和频率下，光纤中存在一对正交的输入偏振态，其对应的输出偏振态也是正交的，并且在一定的频率范围内与频率无关，这样一对初入射偏振态称为光纤的 PSP。理论计算表明，PSP 的带宽仅与平均差分群时延有关($\Delta\tau$)，可近似表示为 $\Delta\omega_{\text{PSP}} = \frac{0.8}{E[\Delta\tau]}(\text{Hz})$ ，式中 $E[\Delta\tau]$ 为 DGD，单位为 s。

应该注意的是，由于 PSP 的带宽是有限的，因此在 DWDM 系统中，单通道 PMD 补偿器受到 PSP 带宽的限制，不能对所有的通道进行有效补偿，特别是当 DWDM 系统中信道数量达到数百时，超过 PSP 带宽的通道将受到 PMD 的较大影响，从而导致整个光纤通信系统中出现功率损耗和码间干扰。

3.2 高阶 PMD 对系统的影响

在忽略 PDL 的情况下，光纤的色散可用 2×2 阶矩阵来表示，即

$$x_{\text{out}}(t) = \frac{1}{2\sqrt{2}}\{ (au^* + bu)[x_{\text{out}}^*(t + \Delta\tau_0/2) + x_{\text{out}}^-(t - \Delta\tau_0/2)] + au[x_{\text{out}}^*(t - 2k + \Delta\tau_0/2) - x_{\text{out}}^-(t - 2k - \Delta\tau_0/2)] + bu^*[x_{\text{out}}^*(t + 2k + \Delta\tau_0/2) - x_{\text{out}}^-(t + 2k - \Delta\tau_0/2)] \}, \tag{5}$$

式中， $a = e^{j\theta} \cos(\epsilon + \pi/4)$ ， $b = e^{-j\theta} \cos(\epsilon - \pi/4)$ ， $u = [1, j]$ ， $u^* = [1, -j]$ ， $x_{\text{out}}(t)^- = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [\mathbf{X}_{\text{in}}(\omega) e^{-aL} e^{j\{\beta(\omega) \pm \Delta\tau \omega^2/2\}}] e^{j\omega t} d\omega$ 。

从式(5)可以看出，由于二阶 PMD 的影响，输出端在时域上是 6 个像。而一阶 PMD 的影响在时域上有两个像，它们的偏振方向正交，DGD 等于 $\Delta\tau_0$ ，波形被展宽。

3.3 二阶 PMD 补偿方案的研究

随着信号带宽的加大或者 PMD 的增大，一阶 PMD 不再有效，这时必须考虑 PMD 矢量对频率的依赖关系，就目前光通信系统单路带宽而言，补偿到二阶 PMD 效应已经可以满足大部分系统的要求。

据分析表明：二阶 PMD 的两个分量对系统性

$T(\bar{\omega}) = e^{-\alpha} e^{-j\beta(\bar{\omega})L} \mathbf{M}(\bar{\omega})$ ，
式中， $\bar{\beta}(\bar{\omega}) = [\beta_x(\bar{\omega}) + \beta_y(\bar{\omega})]/2$ 称为光纤平均传播色散常数； α 为光纤的损耗； t 表示传播时间； L 表示光纤长度。在三维 Stokes 空间，可用 PMD 矢量 Ω 来表示 PMD，

$$\Omega = \Delta\tau \hat{q}, \tag{2}$$

式中， $\hat{q}$ 表示矩阵 $\mathbf{M}(\bar{\omega})$ 两个相互正交的本征矢量之一，称为光纤的 PSP。在一阶近似下 PMD 可写成 $\Omega = \Delta\tau_0 \hat{q}$ 。 $\Delta\tau_0$ 为沿两个 PSP 方向传播的光波产生的 DGD，即一阶 PMD。在二阶近似下 PMD 表示为

$$\Omega = \Delta\tau_0 \hat{q}_0 + (\Delta\tau' \hat{q}_\omega + \hat{q}_\omega \Delta\tau_0) \omega = \Delta\tau_0 \hat{q}_0 + (\Delta\tau_\omega \hat{q}_\omega + \hat{q}_\omega \Delta\tau_\omega) \omega, \tag{3}$$

式中， $\Delta\tau' = \Delta\tau_\omega = \partial(\Delta\tau)/\partial\omega$ ， $\hat{q}_\omega = \frac{\partial \hat{q}}{\partial \omega}$ ， ω 表示对光载波角频率的一阶导数。此时 $\Delta\tau = \Delta\tau_0 + \Delta\tau_\omega \omega$ 。

$\hat{q}_\omega$ 和 $\Delta\tau_\omega$ 称为二阶 PMD，前者称为去偏振效应，是由于 PSP 随频率旋转的结果，后者称为偏振相关色度色散(PCD)，光脉冲可以用琼斯矢量表示：

$$\mathbf{X}_{\text{out}}(\omega) = T(\omega) \cdot \mathbf{X}_{\text{in}}(\omega) \mathbf{e}_{\text{in}} = \mathbf{X}_{\text{out}}(\omega) \mathbf{e}_{\text{out}}(\omega), \tag{4}$$

式中， $\mathbf{X}_{\text{in}}(\omega)$ 是 $x_{\text{in}}(t)$ 经傅里叶变换后的形式， $\mathbf{X}_{\text{out}}(\omega) = \mathbf{X}_{\text{in}}(\omega) e^{-aL} e^{-j\beta(\omega)L}$ ，而 $\mathbf{e}_{\text{out}}(\omega) = \mathbf{M}(\bar{\omega}) \mathbf{e}_{\text{in}}$ 是输出琼斯矢量， $\mathbf{e}_{\text{in}} = [\mathbf{e}_{\text{in}x}, \mathbf{e}_{\text{in}y}]$ 为输入偏振琼斯矢量。

对于二阶 PMD，输出的时域脉冲可写为

能的影响程度是不一样的，其中 PSP_{rr} 对系统代价的影响较大。与一阶 PMD 补偿器相比，二阶补偿器要补偿的量至少多出一个，因此要求补偿器的自由度相应地增多，两阶段补偿器就是其中的一种，其结构如图 1 所示。

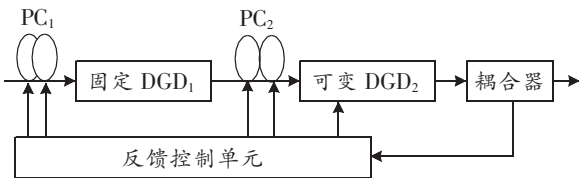


图 1 两阶段补偿器

这种两阶段补偿器的第 1 段主要用于补偿 PSP_{rr} ，对二阶 PMD 补偿的性能主要取决于第一阶