

实验 8 单模光纤的色散和损耗特性测量实验

一、实验目的

1. 理解光纤色散的概念；
2. 理解光纤损耗的概念；
3. 了解并掌握相移法测量单模光纤色散的方法；
4. 了解并掌握插入法测量光纤损耗这一常用方法；
5. 通过本实验，对光纤通信有一定的了解。

二、实验原理

光信号经光纤传输后要产生损耗和畸变（失真），因而使得输出信号和输入信号不同。对于脉冲信号，不仅幅度要减小，而且波形要展宽。产生信号畸变的主要原因就是光纤中存在色散和损耗。色散限制系统的传输容量，损耗则限制系统的传输距离。本实验讨论光纤的色散和损耗特性并对单模光纤的色散和损耗进行测试。

第一部分：光纤的色散

一、色散概述

色散（Dispersion）是光纤最重要的传输特性之一。色散是在光纤中传输的光信号由于不同成分的光的时间延迟不同而产生的一种物理效应。色散一般包括模式色散、材料色散和波导色散。模式色散又称模间色散，只存在于多模光纤中，它是由于不同模式的时间延迟不同而产生的，每一种模式到达光纤终端的时间先后不同，造成了脉冲的展宽，从而出现色散现象，它取决于光纤的折射率分布，并和光纤的材料折射率的波长特性有关；材料色散取决于光纤材料折射率的波长特性和光源的谱线宽度；波导色散又称结构色散，它取决于波导尺寸和纤芯与包层的相对折射率差。

色散对光纤传输系统的影响，在时域和频域表示方法不同。如果信号是模拟调制的，色散限制带宽（Bandwidth）；如果信号是数字脉冲，色散产生脉冲展宽（Pulse broadening）。色散一般用 3dB 光带宽^{【注】}（即为半高峰处的带宽）或者脉冲展宽 σ 来表示。

用脉冲展宽表示时，光纤色散 σ 可以写为：

$$\sigma = (\sigma_n^2 + \sigma_m^2 + \sigma_w^2)^{1/2}, \quad (1)$$

（1）式中 σ_n 、 σ_m 、 σ_w 分别为模式色散、材料色散和波导色散所引起的脉冲展宽的均方根值。

二、多模光纤的色散

由多模光纤折射率分布的普遍公式，假设每个传输模式具有相同的功率，经过计算，可以得到长度为 L 的多模光纤的脉冲展宽为：

$$\sigma = (\sigma_{\text{模间}}^2 + \sigma_{\text{模内}}^2)^{1/2}, \quad (2)$$

1. （2）式中 $\sigma_{\text{模间}}$ 为模式色散产生的脉冲展宽。

$$\text{对于突变型多模光纤：} \sigma_{\text{模间}}(g \rightarrow \infty) \approx \frac{LN_1\Delta}{2\sqrt{3}c}; \quad (3)$$

$$\text{对于渐变型多模光纤: } \sigma_{\text{模间}}(g = 2 + \varepsilon) \approx \frac{LN_1\Delta^2}{4\sqrt{3}c}, \quad (4)$$

可见渐变型多模光纤的脉冲展宽比突变型多模光纤减小 $\Delta/2$ 倍。

上式中, $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ 为相对折射率差, c 为光速, g 为折射率分布指数,

$$N_1 = n_1 - \lambda \frac{dn_1}{d\lambda}, \quad \varepsilon = -\frac{2n_1}{N_1} \frac{\lambda}{\Delta} \frac{d\Delta}{d\lambda}$$

2. (2) 式中 $\sigma_{\text{模内}}$ 为模内色散产生的脉冲展宽, 对于一般的多模光纤, 主要为材料色散, 可以简化为:

$$\sigma_{\text{模内}} \approx -\frac{L\sigma_\lambda^2 \lambda d^2 n_1}{c d\lambda^2} \quad (5)$$

上式中, σ_λ 为光源功率谱的谱线宽度。

三、单模光纤的色散

模内色散系数: 理想圆对称单模光纤的色散由于不存在模畸变(只有一个基模, 不存在高阶模, 忽略偏振态的改变), 传导光脉冲的展宽完全是由波导色散和材料色散决定, 人们常把这种基模的一个模内的色散定义为模内色散, 有时为了和其他色散进行区分, 也称色度色散(Chromatic Dispersion), 表明是和光的“色彩”(波长)有关。常简称为色散, 它是时间延迟随波长变化的结果。模内色散系数的定义是: 单位光源光谱宽度、单位光纤长度所对应的光脉冲的展宽(延时差) [ps/(nm·km)]:

$$\sigma = \frac{d\tau(\lambda)}{d\lambda} [\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})]$$

对所有类型的单模光纤, 该系数是可以根据测定不同波长的光通过一定长度的光纤的相对时差(延时)来确定的。

偏振模色散: 在理想完善的单模光纤中, 单模光纤只能传输一种基模的光。基模实际上是由两个偏振方向相互正交的模场 HE_{11x} 和 HE_{11y} 简并组成。但实际的单模光纤不可避免存在一定的缺陷, 如纤芯不圆度、微弯力、内部残余应力等, HE_{11x} 和 HE_{11y} 存在相位差, 则合成光场是一个方向和瞬时幅度随时间变化的非线性偏振, 就会产生双折射现象, 即 x 和 y 方向的折射率不同。因传播速度不等, 模场的偏振方向将沿光纤的传播方向随机变化, 从而会在光纤的输出端产生偏振模色散(Polarization-Mode Dispersion, 即 PMD)或双折射色散。在高速光纤通信系统(如 10Gbit/s 和 40Gbit/s 甚至更高)中, 光纤的 PMD 对整个通信系统性能的影响不能被忽视。生产单模光纤的各种技术中, PCVD 工艺生产出的单模光纤具有较低的偏振模色散。

第二部分: 光纤的损耗

由于损耗的存在, 在光纤中传输的光信号, 不管是模拟信号还是数字脉冲信号, 其幅度都要减小。光纤的损耗在很大程度上决定了光纤通信系统的传输距离。目前光纤损耗已经降低到低于 0.2dB/km (在 1550 nm 处), 低损耗光纤的问世导致了光纤通信技术领域的革命, 开创了光纤通信的时代。目前, 正在开展研究并蓬勃发展的光纤通信新技术有超大容量的波分复用光纤通信和超长距离的光孤子通信系统等。

在最一般的情况下，光纤内传输的光功率 P 随传输距离 z 的变化，可以用下式表示：

$$\frac{dP}{dz} = -\alpha P$$

上式中， α 是损耗系数。假设长度为 L (km) 的光纤，输入光功率为 P_i ，根据上式输出光功率应为：

$$P_o = P_i \exp(-\alpha L)$$

习惯上 α 的单位用 dB/km，很容易得知损耗系数为：

$$\alpha = \frac{10}{L} \lg \frac{P_i}{P_o} \quad (\text{dB/km})$$

光纤损耗的机理

图 1 即为单模光纤的损耗谱示意图。光纤的损耗主要由材料的吸收损耗以及散射损耗组成，各部分具体描述如下：

1、材料吸收损耗

主要由 SiO_2 材料引起的固有吸收和由杂质引起的吸收产生。由 SiO_2 材料电子跃迁引起的吸收带发生在紫外 (UV) 区 ($\lambda < 0.4 \mu\text{m}$)，由分子振动引起的吸收带发生在红外 (IR) 区 ($\lambda > 7 \mu\text{m}$)，由于 SiO_2 是非晶块状材料，两种吸收带从不同方向伸展到可见光区。由 SiO_2 材料产生的固有吸收很小，在 $0.8 \sim 1.3 \mu\text{m}$ 波段，小于 0.1 dB/km ，在 $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 波段，小于 0.03 dB/km 。由氢氧根离子产生的吸收峰出现在 $0.95 \mu\text{m}$ 、 $1.24 \mu\text{m}$ 和 $1.39 \mu\text{m}$ 波长处，其中以 $1.39 \mu\text{m}$ 波长处吸收峰的影响最为严重。正是由于光纤通信波段内这一系列吸收峰的存在，使得峰之间的低损耗区构成了光纤通信的三个传输窗口。目前氢氧根离子的含量已经降低到 10^{-9} 以下，从而 $1.39 \mu\text{m}$ 波长处的吸收峰损耗也降低到 0.5 dB/km 以下。这种减低吸收峰的光纤被称为全波光纤 (AllWavelength Fiber)。

2、散射损耗

光纤的散射损耗主要由材料微观密度不均匀性引起的瑞利 (Rayleigh) 散射和由光纤结构缺陷 (如气泡) 引起的散射产生的。结构缺陷散射产生的损耗与波长无关。瑞利散射损耗 a_R 与波长四次方成反比，可用经验公式表示为 $a_R = A / \lambda^4$ ，瑞利散射系数 A 取决于纤芯与包层折射率差 Δ 。当 Δ 分别为 0.2% 和 0.5% 时， A 分别为 0.86 和 1.02 。瑞利散射是一种基本损耗机理，它是由于光纤在制造过程中沉积到熔石英中的随机密度变化引起折射率本身的起伏，从而导致光向各个方向散射所产生。瑞利散射损耗对光纤来说是其本身固有的，因而它确定了光纤损耗的最终极限。例如在 $1.55 \mu\text{m}$ 波段，光纤瑞利散射引起的损耗最低理论极限约为 1.149 dB/km 。

根据以上分析和经验，光纤总损耗 α 与波长 λ 的关系可以表示为：

$$\alpha = \frac{A}{\lambda^4} + B + CW(\lambda) + IR(\lambda) + UV(\lambda)$$

上式中, A 为瑞利散射系数, B 为结构缺陷散射产生的损耗, $CW(\lambda)$ 、 $IR(\lambda)$ 和 $UV(\lambda)$ 分别为杂质吸收、红外吸收和紫外吸收产生的损耗。

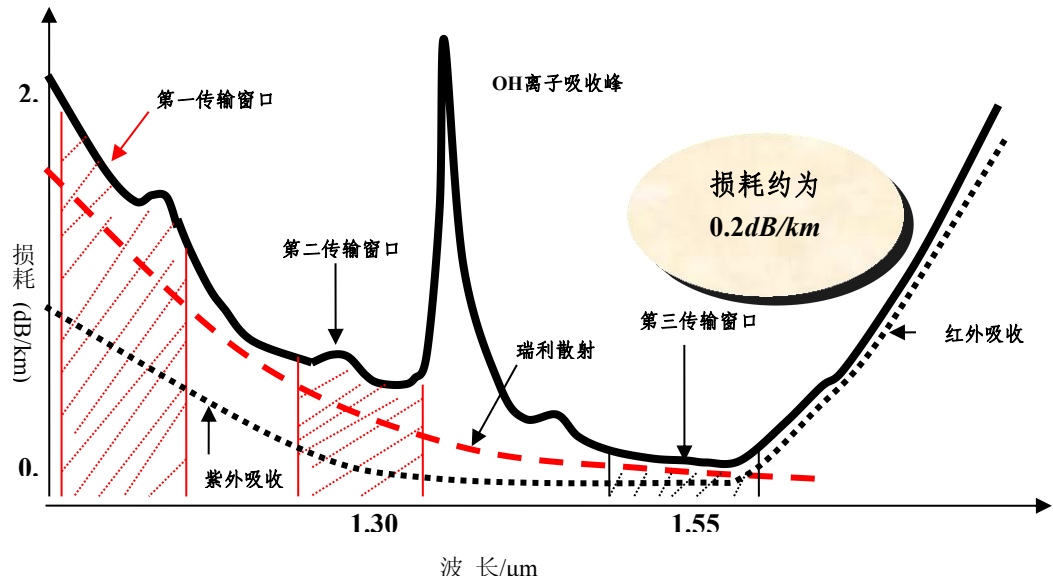


图1 单模光纤的损耗谱线，示出各种损耗机理

根据以上分析和经验，光纤总损耗 α 与波长 λ 的关系可以表示为：

$$\alpha = \frac{A}{\lambda^4} + B + CW(\lambda) + IR(\lambda) + UV(\lambda)$$

上式中, A 为瑞利散射系数, B 为结构缺陷散射产生的损耗, $CW(\lambda)$ 、 $IR(\lambda)$ 和 $UV(\lambda)$ 分别为杂质吸收、红外吸收和紫外吸收产生的损耗。

3、单模光纤色散和损耗的测量

(1) 色散的测量

单模光纤色散的测量方法很多，例如相移法（频域法）、脉冲法（时域法）、干涉法等，这里我们仅介绍由 ITU-T（国际电信联盟—电信标准化机构）和 IEC（国际电工委员会）等国际标准组织推荐的“相位移动方法”（PHASE-SHIFT METHOD）。根据国际标准 ITU 和 IEC 等的规定，测量单位光纤长度乘波长的群延时数据，宜用 Sellmeier 三项表达式来拟合。

实验原理示意图如下：

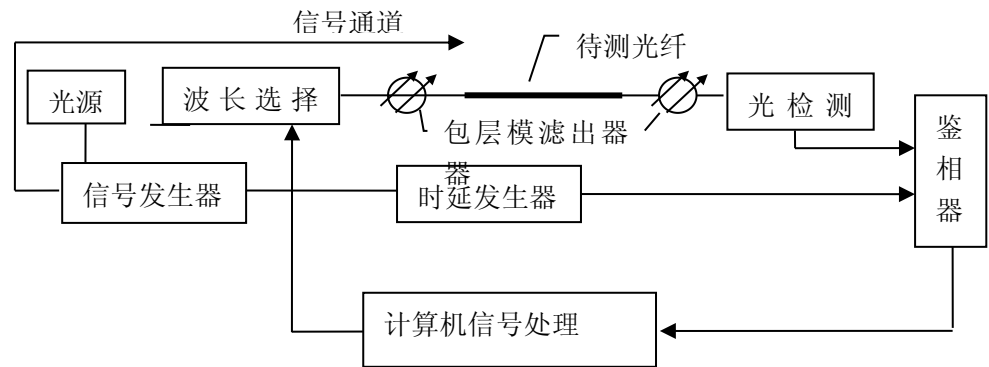


图2 相移法测量单模光纤色散的实验原理示意图

系统由光源、波长选择器、信号发生器、包层模滤出器、光探测器、时延发生器、鉴相

器以及计算机处理部分等组成,测量时波长选择器选择波长 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ 并且选择信号发生器调制合适的调制频率,使得所有波长的相位延时 Φ_i 满足 $2N\pi < \Phi_i < (2N+2)\pi$, 于是当波长差别很小的时候,不同波长的时延 τ_i 有下面的关系:

$$\frac{\tau_{i+1} - \tau_i}{\lambda_{i+1} - \lambda_i} \approx \frac{d\tau}{d\lambda} = D(\lambda_i)$$

即可得到不同波长的色散值。

(2) 损耗的测量

测量光纤损耗的常用方法包括插入法和剪断法两种,这里只简单介绍一下原理,有兴趣的同学可以查阅相关技术标准(如 ITU-T G.650~G.655, IEC60793-1-4(1995), GB8401-87, GB/T 9771-200X 等)。

插入法的原理很简单,即先使用一根短的标准跳线连接光源和功率计之间,记录功率值 P_0 ,再用待测光纤代替短跳线,测量这种情况下的功率计 P_1 ,用这两个功率的差 $(P_1 - P_0)$ 除以待测光纤的长度(L),即可得到待测光纤单位长度的损耗值(dB/km)。需要注意的是尽可能保持其它条件不变,光纤位置、弯曲程度、接头等都尽量保持不变,并且保证光纤中的模式受到均匀的激励。表示如下:

$$\alpha = (P_1 - P_0) / L \quad (\text{dB/km})$$

剪断法的基本原理是将待测光纤接入光源和功率计之间,然后纪录这个时刻的功率值 P_1 ,再将光纤在离光源耦合端保留大约 20cm,测量此时的光功率值 P_0 ,然后再利用上式计算光纤的损耗值。剪断法所用仪器简单,测量结果准确,因而被确定为测量光纤损耗的基准方法,但这种方法是破坏性的,不利于多次重复测量,所以在实际应用中,多采用插入法。

此外,由于瑞利散射光功率与传输光功率成比例。还可以利用与传输光相反方向的瑞利散射光功率来确定光纤损耗,这种方法称为后向散射法,所用的仪器为光时域反射仪(OTDR),这种仪器采用单端输入和输出,不破坏光纤,使用非常方便,OTDR 不仅可以测量光纤损耗系数和光纤长度,还可以测量连接器和接头的损耗,观察光纤沿线的均匀性和确定故障点的位置,是光纤通信系统工程现场不可缺少的工具之一,但其价格也十分昂贵。

本实验采用插入法来测量 G.652 单模光纤的损耗值。

四、实验内容与步骤

(一) 色散测量

我们实验中,使用的测量色散的方法,和前面的原理相同,本实验装置示意图如下:

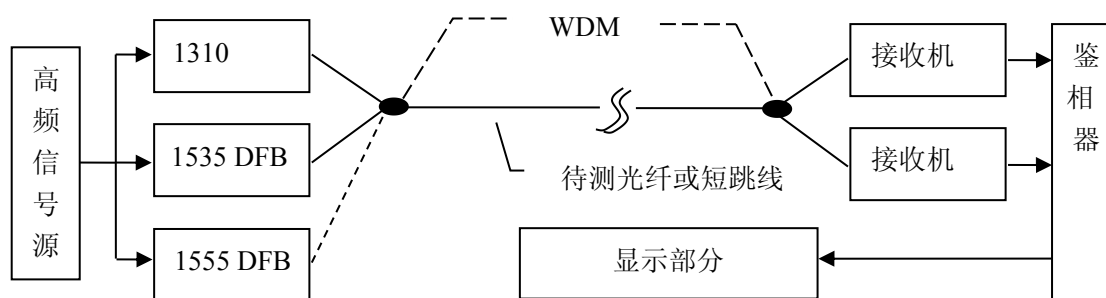


图3 实际实验装置示意图

如图所示,如果 1535nm 和 1310nm 经过待测光纤后相位相差为 $2N\pi + \Phi_1$, $(-\pi < \Phi_1 < \pi)$, 不改变信号源频率使得 1310nm/1555nm 经过待测光纤后的相位差为 $2N\pi + \Phi_2$, $(-\pi < \Phi_2 < \pi)$, 我们可以得到 1535nm/1555nm 两个信号光经过待测光纤后相位差为 $\Phi_1 - \Phi_2$, 那么相对应的色散值为:

$$D(1550) \approx \frac{\tau_{i+1} - \tau_i}{\lambda_{i+1} - \lambda_i} = \frac{(\Phi_1 - \Phi_2)/2\pi f L}{1555 - 1535} = \Delta\tau / 20 / L \quad (\text{ps/nm/km})$$

式中： f 为信号源调制频率， L 为待测光纤长度。

注：由于鉴相器只能给出两个数据的相位差的绝对值，所以试验中当 Φ_1 和 Φ_2 不同号时，利用上式会出现数值明显错误，这个时候要把两个相位差的绝对值相加，而不是相减。

1. 打开光纤光源、色散测试仪的电源（各仪表电源开关在仪器后面板），并预热 5 分钟；
2. 用波分复用器（WDM）将光纤光源和色散测试仪部分相连接：按照实际实验装置示意图图 3 中实线的接法，光源部分先连接 1310nm 和 1535nm，即将 WDM 的短跳线分别把光纤光源的 1310nm 和 1535nm DFB 激光输出口接成单芯同向的 WDM 传输模式，其输出端通过一个法兰盘与另外一个 WDM 连接，并将另外一个 WDM 的 1310nm 和 1535nm/1550nm DFB 输出分别同光纤色散测试仪的相应输入口连接，记录此时的相位差为初始相位差 Φ_{10} ；（注意所有光纤连接时，都应该保持端面清洁或者擦拭干净）
3. 将与光源相连的 WDM 连接 1535nm 端改接在 1555nm 输出端的短跳线上（如图中虚线），其余连接不变，记录此时的相位差为初始相位差 Φ_{20} ；
4. 将待测光纤 a 代替原短跳线按照实际实验原理框图中实线的接法，把 1335nm DFB 和 1310nm 接成 WDM 传输模式，记录此时的相位差 Φ_{11} ；
5. 将 WDM 连接 1535nm 端接在 1555nm 输出端的短跳线上（如图中虚线），记录此时的相位差 Φ_{21} ；
6. Φ_1 和 Φ_2 分别是 $\Phi_{11} - \Phi_{10}$ 和 $\Phi_{20} - \Phi_{21}$ ，利用公式计算 1550 窗口的待测光纤的色散；
7. 多次重复 2~6 步骤，求平均值；
8. 更换光纤，重复 2~7 步，测量另外光纤的色散。

（二）损耗测量

1. 打开光源和光纤功率计的电源开关，并预热 5 分钟；
2. 选择光纤功率计与待测信号相对应的波长值， λ 键是循环按键，即分别在 1310、1550... 波长值之间循环选择；
3. 待测定功率显示值稳定后，按一下功率值线性值 W 和对数值 dBm 转换键（‘W/dBm’），将显示功率为 dBm 表示，再按一下参考选择键（Ref），将现在的功率值作为参考值存入，然后按一下清零键/参考设置键（CLR/set）键，此时显示应为 0.0000dB；
4. 接入待测光纤，读数即为其的插入损耗，单位为 dB；
5. 将测得的插入损耗值除以光纤的长度，即为所测光纤在该波长的单位长度的损耗值；
6. 选择另外一个波长重新测试；
7. 多次重复 2~6 步骤，求平均值；
8. 更换光纤，重复 2~7 步，测量另外光纤的损耗。

五、实验注意事项

1. 实验中光纤光源出来的光为较强的红外光，为保护你的眼睛，切勿将该光直接对准你的眼睛；
2. 由于本实验的仪器都十分昂贵，实验时应该特别注意轻拿轻放：切勿用力过猛以免损伤器件！严禁过分折弯光纤跳线和光纤以免折断！电源开关不要过于频繁，以免影响激光器寿命。对故意操作不当造成的仪器损坏，责任自负！
3. 超量程的输入光信号会损坏探测器，不可直接测量超量程光，如实在需要应该加相应倍数的衰减器，不要将超过 2mW 的光信号直接输入到光纤功率计探头，测量大

功率的信号可以考虑使用衰减器；

4. 为保证测量结果的精度，光纤跳线连接器插入仪表前，应注意保持端面清洁，可用无纤擦拭纸擦连接器插头端；连接时不能过松或者过紧；并应该多次测量求平均值；
5. 仪表使用一段时间后，若发现测试值偏小时，可以用牙签缠上脱脂棉插入探测器孔清洁，切勿用酒精等之类清洁剂清洁探测器光窗口。
6. 做完实验后，光纤跳线可以不必从仪表上取下，保持连接即可，有利于避免因频繁插拔而弄脏跳线连接端面或对器件造成损伤。

七、思考题

1. 光纤色散产生的原因及其危害是什么？
 2. 光纤损耗有哪些，其产生机理是什么？
 3. 什么是单模光纤，什么是多模光纤？
 4. 请分别简述相移法测量光纤色散和插入法测量光纤损耗的原理。
-