

# OFDR（光频域反射技术）的原理介绍

## 1、光纤中的散射

当光通过不均匀介质时会向四面八方传播，这就是光的散射，例如晴朗的天空呈现蓝色，海水也是蓝的，这都是太阳光发生散射的结果（波长较短的蓝光被大气微粒散射）。同样的，当光在光纤中传输时，由于光纤中折射率分布不均匀，也会发生散射，主要有瑞利散射，布里渊散射与拉曼散射三种形式。

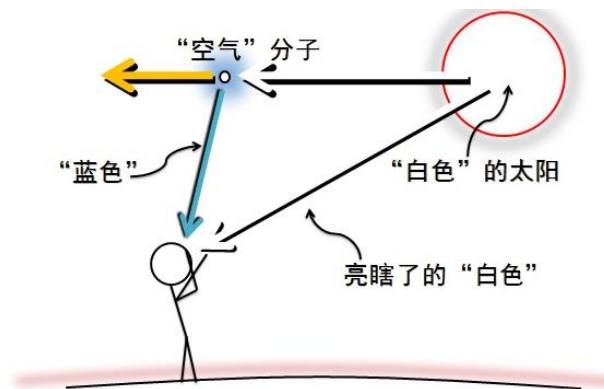


图 1 太阳光的散射

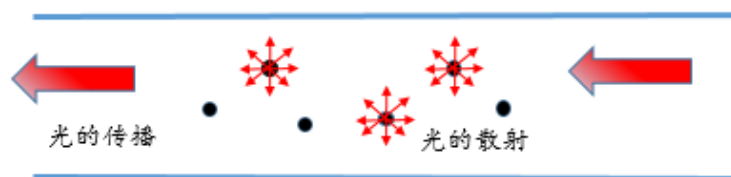


图 2 光纤中的散射

散射是光波与光纤介质的粒子相互作用的结果。瑞利散射中，入射光被散射后，波长、频率并未发生变化，是一种弹性散射；布里渊散射中入射光与光纤中声波场发生作用，会出现高于原入射光频率的光和低于原入射光频率的光。拉曼

散射产生的结果与之类似，两者都属于非弹性散射。

分布式光纤传感技术（DOFS）就是通过采集光纤中散射光的信息进行测量的，可以分成如下几类：

表 1 分布式光纤传感技术的分类

类别	测试方法	优点	缺点	主要应用
瑞利散射	OTDR	测量距离长	空间分辨率较低	损耗、断点等检测及振动传感
	OFDR	高精度短距离测量	测量距离较短	损耗、断点等检测，偏振串扰、光谱测量，温度与应变传感
拉曼散射	ROTDR	测量距离长	空间分辨率较低	温度传感
	ROFDR			
布里渊散射	BOTDR	测量距离长，	测试时间较长，测试系统复杂	温度与应变传感
	BOTDA	空间分辨率较高		
	BOFDA	空间分辨率较高		

目前，OTDR 技术发展成熟，多用于集成光路的诊断和光通信网络故障的检测，但受探测光脉冲宽度及空间分辨率与动态范围之间矛盾的限制，难以同时满

足较大动态范围和较高空间分辨率，不适用于高精度测量领域。在温度与应变传感领域，多使用基于布里渊散射的 BOTDR、BOTDA 及 BOFDA 技术，其中 BOFDA 技术最高能实现 2cm 的空间分辨率，但整个测试系统十分复杂，测量时间较长。

OFDR 技术是利用扫频光源相干检测技术对光纤中的光信号进行检测的一项技术，由于不受空间分辨率与动态范围之间矛盾的限制，其同时具备空间分辨率高（光学测量可达  $10\mu\text{m}$ ），动态范围大，测试灵敏度高等特点，适用于短距离高精度监测领域如光器件内部剖析、土木工程模拟试验、车辆结构研究等。

## 2、光学相干检测

光学相干检测的基本原理和无线电波外差探测原理基本一致，故又称光外差检测。它是利用光的相干性将包含被测信号的探测光和作为基准的参考光在满足一定条件下进行混频，输出两光波的差频信号的一种检测技术，其基本原理如下图：

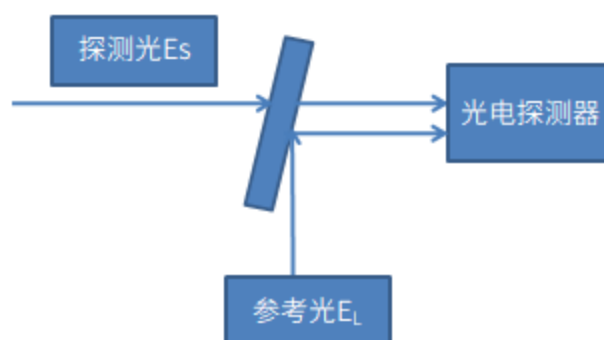


图 1 相干检测基本原理

设探测光、参考光的光电场分别为：

$$E_s(t) = A_s \cos(\omega_s t + \varphi_s)$$

$$E_L(t) = A_L \cos(\omega_L t + \varphi_L)$$

则光电探测器输出的光电流为：

$$I(t) = \beta [\overline{E_s(t) + E_L(t)}]^2$$

其中， $\beta$  为光电变换系数。光电流表达式展开后前两项为直流项，第三项为和频，合频频率太高不能被光电探测器检测到，第四项为差频项，表达式为：

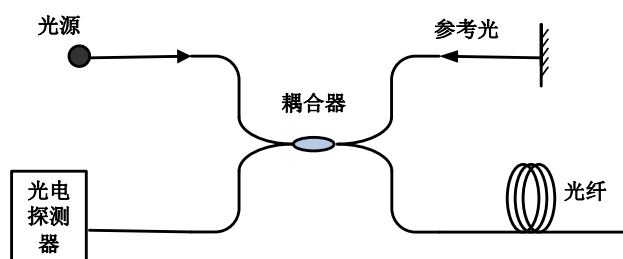
$$I_o(t) = \beta A_s A_L \cos[(\omega_L - \omega_s)t + (\varphi_L - \varphi_s)]$$

$\Delta\omega = \omega_L - \omega_s$  是光频差， $\Delta\phi = \phi_L - \phi_s$  是相位差。当  $\Delta\omega = 0$  时为外差检测的特殊形式，即零差检测。参考光的各项参数是已知的，从输出电流中即能解调出信号光的频率、振幅、相位等信息。

相干检测是一种间接检测技术，它把高频光信号转换到易于检测的中频信号上，具有转换增益高、检测能力强、信噪比高等优点，在光通信、测量领域有广泛的应用。

### 3、OFDR（光频域反射技术）原理

OFDR（光频域反射技术）是一种基于光纤中瑞利散射的背向反射技术，光源发出的线性扫频光经耦合器分为两路，一路进入待测光纤中，在光纤各个位置上不断地产生瑞利散射信号，信号光是背向的，与另一路参考光耦合到探测器上进行相干混频。待测光纤不同位置，光频率不同，信号光与参考光的频差也不同。通过频率测量可以获得待测光纤中各位置的光强。频率对应于光纤的位置，光强对应于此位置的反射率和回损。



光在光纤中向前传输时，当光纤中出现缺陷产生损耗时，不同位置处产生的瑞利散射信号便携带了这些损耗信息。对瑞利散射信号光进行频率检测，就能准确定位光纤沿线出现的熔接点、弯曲、断点等。OFDR 技术就是通过上述原理实现光纤链路的诊断。

另一方面，当待测光纤置于外界的温度场或应变场中，光纤受温度或应变影响，光纤内部折射率分布会有变化，相应的瑞利散射信号光的频率也会有变化，通过瑞利散射信号光的频率测量，可以对应外界温度场或应变场的变化。从而实现分布式光纤传感。

## 4、OFDR 设备

### 4.1 OCI1500 光学链路诊断仪

OCI1500 产品是一款超高精度的光纤断点检测、损耗测量、分布式温度应变传感设备。其原理基于光频域反射技术与光外差检测技术相结合，实现 50 米测量范围内的空间分辨率可达 10 $\mu$ m。本产品可在待测光纤链路中轻松查找判别宏弯、接头、连接点和断点。在分布式温度应变测量中，空间分辨率可达 5mm，传感精度最高可达  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  \  $\pm 1.0\mu\epsilon$ 。



主要应用：

光通信测量：

- 光器件、光模块测量。
- 硅光芯片测量。

光纤传感测量：

- 光纤光栅
- 光纤微结构

分布式温度、应变传感：

- 复合材料应变测量
- 电力系统：变压器温度监测
- 土木建筑：结构健康监测

OCI1500 的主要特点：

- 光纤测量 10μm 空间分辨率
- 100m 长度测量范围（可升级长度）
- 传感空间分辨率可达 5mm
- 传感精度±0.1℃/±1.0με
- 设备出厂后无需校准，长期稳定性好

OCI1500 的关键技术指标：

类别	指标	单位
系统		

测量范围 <sup>1</sup>	100	50	m
空间分辨率	20	10	um
回损动态范围	70		dB
插损动态范围	18		dB
回损灵敏度	-130		dB
插损回损精度	±0.1		dB
臂差延时测量 <sup>2</sup>			
测量长度	100		m
重复精度 <sup>3</sup>	0.1		mm
应变温度传感			
传感长度	100		m
传感空间分辨率	5		mm
应变测量精度	±1.0		με
应变测量范围 <sup>4</sup>	±15000		με
温度测量精度	±0.1		°C
温度测量范围 <sup>4</sup>	-200-1200		°C
光谱			
波段 <sup>5</sup>	1525-1625		nm
波长分辨率	0.03		pm
波长重复精度	±1		pm

群延时		
精度	1	ps
测量时间 <sup>6</sup>	<8	s
接口		
输入电压	220/110V	AC
通讯接口	USB	-
光纤接口	FC/APC	-
尺寸	410x375x146.5	mm
重量	15	KG

备注：波段可定制，如 O 波段，1064nm 等。

#### 4.2 OSI-S 分布式光纤传感仪

OSI-S 产品是一款超高精度分布式光纤传感设备。其原理基于光频域反射（OFDR）技术，实现 50m 传感范围内空间分辨率可达 1mm，100m 传感范围内空间分辨率可达 1cm。传感精度为  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}/1.0\mu\epsilon$ 。本产品可在



一根光纤上同时测量成千上万个传感点，广泛应用于长距离、高分辨率、高精度



传感领域。

主要应用：

- 复合材料抗疲劳检测
- 电力系统：变压器温度监测
- 土木建筑：结构健康监测

OSI-S 的主要特点：

- 分布式温度、应变测量
- 传感空间分辨率为 1mm
- 传感精度±0.1°C/1.0µε
- 测量范围 20m、50m、100m
- 提供定制化服务

OSI-S 的关键技术指标：

类别	指标			单位
传感长度 <sup>1</sup>	20	50	100	m
空间分辨率 <sup>2</sup>	1		10	mm
采样率 <sup>3</sup>	4			Hz
应变				

传感精度 <sup>4</sup>	±1.0	με
测量范围	±15000	με
温度		
温度传感精度 <sup>4</sup>	±0.1	°C
测量范围 <sup>5</sup>	-200~1200	°C
接口		
输入电压	220/110V	AC
通讯接口	USB	-
光纤接口	FC/APC	-
尺寸	410x375x146.5	mm
重量	15	KG