
OTDR 在光纤测量中的应用

光时域反射计OTDR(Optical Time Domain Reflectometer)是表征光纤传输特性的测试仪器。此仪器主要用于测试整个光纤链路的衰减并提供与长度有关的衰减细节,具体表现为探测、定位和测量光纤链路上任何位置的事件(事件是指因光纤链路中熔接、连接器、弯曲等形成的缺陷,其光传输特性的变化可以被测量)。OTDR测试的非破坏性、只需一端接入及直观快速的优点使其成为光纤光缆生产、施工、维护中不可缺少的仪器。

1 OTDR原理

1.1 瑞利后向散射

由于光纤本身的缺陷和掺杂组分的非均匀性,使得光纤中传播的光脉冲发生瑞利散射。一部分光(大约有 0.0001%⁽¹⁾)沿脉冲相反的方向被散射回来,因而被称为瑞利后向散射,后向散射光提供了与长度有关的衰减细节。

设注入光功率为 P_0 ,则沿光纤传输到 z 处的后向散射光再传回到始端的光功率为

$$P_z = P_0 \cdot \eta_{(z)} \exp\left[-\int_0^z \gamma_{f(z)} dz - \int_0^z \gamma_{b(z)} dz\right] \quad (1)$$

其中, $\gamma_{f(z)}$ 、 $\gamma_{b(z)}$ 分别为 z 处正向、后向传输时的衰减系数, $\eta_{(z)}$ 为光纤在 z 处的后向散射系数,与瑞利散射系数及光纤的结构参数有关。如果能测得 z_1 、 z_2 两处散射回来的光功率,即可求得 z_1 、 z_2 间前后向传输的平均衰减系数 α

$$\alpha = \frac{5}{z_2 - z_1} \left[\lg \frac{P_{(z_1)}}{P_{(z_2)}} - \lg \frac{\eta_{(z_1)}}{\eta_{(z_2)}} \right] \quad (2)$$

若光纤结构参数沿轴向均匀(即 $\eta_{(z_1)} = \eta_{(z_2)}$)时,则 z_1 和 z_2 点间的衰减系数可表述为

$$\alpha = \frac{5}{z_2 - z_1} \lg \frac{P_{(z_1)}}{P_{(z_2)}} \quad (3)$$

与距离有关的信息是通过时间信息而得到的(此即光时域反射计中时域的由来), OTDR 测量发出脉冲与接收后向散射光的时间差, 利用折射率 n 值将这一时域信息转换成距离

$$z = \frac{ct}{2n} \quad (4)$$

其中 c 为光在真空中的速度 ($3 \times 10^8 \text{m/s}$)

OTDR 可以非常精确测量后向散射光功率 $P_{(z1)}$ 、 $P_{(z2)}$, 并通过式 (3) 与式 (4) 来测量沿光纤长度上任一点光纤特性的微小变化, 如图 1 所示。

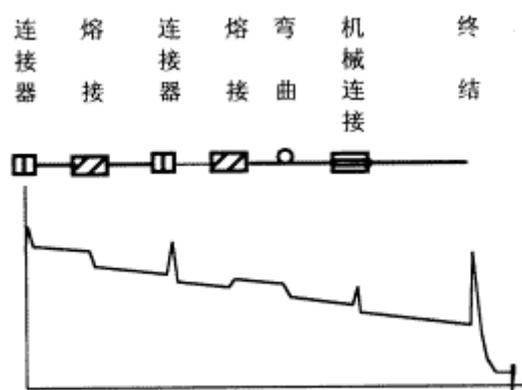


图 1 OTDR 曲线与光纤链路的对应关系

在不同折射率两传输介质的边界(如连接器、机械接续、断裂或光纤终结处)会发生菲涅耳反射, 此现象被 OTDR 用于准确确定沿光纤长度上不连续点的位置。反射的大小依赖于边界表面的平整度及折射率差, 利用折射率匹配液可减小菲涅耳反射。

1.2 OTDR 结构方框图

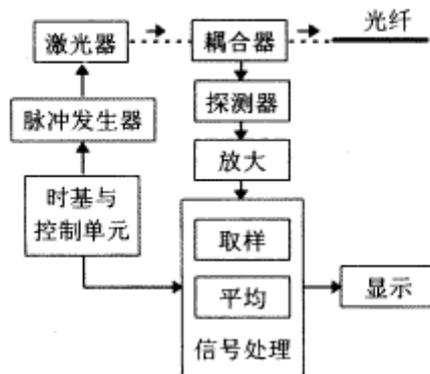


图 2 OTDR 原理结构方框图

图 2 是 OTDR 原理结构方框图。脉冲发生器发出宽度可调的窄脉冲驱动激光二极管 (LD)，产生所需宽度的光脉冲 (通常为 $2\text{ns}\sim 20\mu\text{s}$)，经方向耦合器后入射到被测光纤，光纤中的后向散射光和菲涅耳反射光经耦合器进入光电探测器，光电探测器把接收到的散射光和反射光信号转换成电信号，由放大器放大后送信号处理部件处理 (包括取样、模数转换和平均)，结果由显示部件显示：纵轴表示功率电平，横轴表示距离。时基与控制单元控制脉冲宽度、取样和平均。

2 OTDR 主要性能指标

对 OTDR 的性能参数的了解有助于 OTDR 的实际光纤测量。OTDR 性能参数主要包括动态范围、盲区、分辨率、精度等。

2.1 动态范围 (Dynamic range)

动态范围是 OTDR 主要性能指标之一，它决定光纤的最大可测量长度。动态范围越大，曲线线型越好，可测距离也越长。动态范围目前还没有一个统一的标准计算方法⁽¹⁾，常用的动态范围定义主要有以下四种：

① IEC 定义 (Bellcore)：常用的动态范围定义之一。取始端后向散射电平与噪声峰值电平间的 dB 差，测量条件为取 OTDR 最大脉冲宽度、180 秒的测量时间。

② RMS 定义：最常用的动态范围定义。取始端后向散射电平与 RMS 噪声电平间的 dB 差。若噪声电平呈高斯分布，则 RMS 的定义值比 IEC 定义值高约 1.56 dB。

③ $N=0.1\text{dB}$ 定义：最实用的定义方法。取可以测量损耗为 0.1 dB 事件时的最大允许衰减值。 $N=0.1\text{dB}$ 定义值比信噪比 $\text{SNR}=1$ 的 RMS 定义值小大约 6.6 dB，这意味着若 OTDR 有 30 dB 的 RMS 动态范围，则 $N=0.1\text{dB}$ 定义的动态范围只有 23.4 dB，即只能在 23.4 dB 衰减范围内测量损耗为 0.1 dB 的事件。

④ 端探测 (End detection)：光纤始端的 4% 菲涅耳反射峰与 RMS 噪声电平的 dB 差，此值比 IEC 定义值高约 12 dB。

上述四种动态范围定义可用图 3 表示。除以上四种常用的定义外，还有其它的定义

方法。需要注意的是，对同样性能OTDR，不同的定义方法，动态范围值不同，在检查OTDR动态范围指标时必须清楚动态范围值是以哪种定义给出。

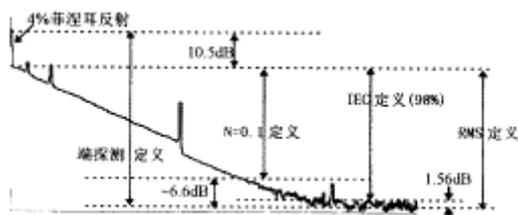


图3 动态范围的定义(对给定的平均时间和脉宽)

2.2 盲区(Deadzone)

“盲区”又称“死区”，是指受菲涅耳反射的影响，在一定的距离范围内OTDR曲线无法反映光纤线路状态的部分。此现象的出现主要是由于光纤链路上菲涅耳反射强信号使得光电探测器饱和，从而需要一定的恢复时间。盲区可发生在OTDR面板前的活结头或光纤链路中其它有菲涅耳反射的地方。

Bellcore定义了两种盲区⁽²⁾：衰减盲区(ADZ)和事件盲区(EDZ)。衰减盲区是指各自的损耗可以分别被测量时的两反射事件间的最小距离，通常衰减盲区是5~6倍的脉冲宽度(用距离表示)；事件盲区是指两个反射事件仍可分辨的最小距离，此时到每个事件的距离可测，但每个事件各自的损耗不可测。两种盲区的定义可用图4表示。

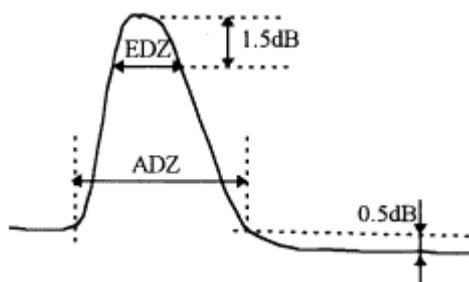


图4 衰减盲区(ADZ)与事件盲区(EDZ)的定义
(-30dB 反射)

盲区的大小与脉冲宽度、反身系数、损耗等因素有关。脉宽越短，盲区越小，但短脉冲同时又减小了动态范围，因此要在盲区和动态范围之间折衷选择脉宽。

2.3 分辨率(Resolution)

OTDR 有四种主要分辨率指标：取样分辨率、显示分辨率(又叫读出分辨率)、事件分辨率和距离分辨率。

取样分辨率是两取样点之间最小距离，此指标决定了 OTDR 定位事件的能力。取样分辨率与脉宽和距离范围大小的选取有关。

显示分辨率是仪器可显示的最小值。OTDR 通过微处理系统将每个取样间隔细分，使光标可在取样间隔内移动，光标移动的最短距离为水平显示分辨率、所显示的最小衰减量垂直显示分辨率。

事件分辨率是指 OTDR 对被测链路中事件点的分辨门限，也就是事件域值(探测阈)，OTDR 把小于这个阈值的事件变化当作曲线中斜率均匀变化点来处理。事件分辨率由光电二极管的分辨阈决定，根据两接近的功率电平，指定可被测量的最小衰减。

距离分辨率指仪器所能分辨的两个相邻事件点间的最短距离，此指标类似与事件盲区，与脉宽、折射率参数有关。

2.4 精度(Accuracy)

表 1

性能指标	波长 (nm)	动态范围 (RMS 定义)	盲区 (m)		分辨率					精度	
			EDZ	ADZ	取样 (m)	显示			事件 (dB)	距离 (m)	
			垂直	水平	衰减 (dB/dB)	距离 (m)					
典型值	1310±20 1550±20	30dB 28dB	5	15	0.25 ~40	0.001dB	0.25m	0.02	1~100	0.02	±1.5

精度是 OTDR 的测量值与参考值的接近程度，包括衰减精度和距离精度。衰减精度主要是由光电二极管的线性度决定的，目前大多数 OTDR 的线性度可达 0.02dB/dB。距离精度依赖于折射率误差、时基误差 ($10^{-4} \sim 10^{-5}$ 范围内变动) 以及取样分辨率，在不考虑折射率误差时，距离精度可用下式表达⁽¹⁾：

$$\text{距离精度} = \pm 1\text{m} \pm 5 \times 10^{-5} \times \text{距离} \pm \text{取样分辨率} \quad (5)$$

除以上几种性能指标外，还包括波长、测量时间等指标。另外，大多数 OTDR 还提供曲线存储、输出端口等功能。下表为目前 OTDR 典型性能指标值。

3 OTDR 的使用

OTDR 可执行下面的测量：

*对每个事件：距离，损耗，反射

*对每个光纤段：段长，段损耗 dB 或 dB/Km，段回波损耗(ORL)

*对整个终端系统：链长度，链损耗 dB，链 ORL

用 OTDR 进行光纤测量可分为三步：参数设置、数据获取和曲线分析。

3.1 参数设置

大多数 OTDR 对待测光纤通过发射测试脉冲自动地选择最佳的获取参数，使用者只需选择波长、获取时间及必要的光纤参数(如折射率、散射系数等)。自动获取参数需要一定的时间，因而，在已知测量条件下，操作者可人工选择测量参数。

3.1.1 波长选择

光系统的行为与传输波长直接相关，不同的波长有各自不同的光纤衰减特性及光纤连接中不同的行为：同种光纤，1550nm比1310nm光纤对弯曲更敏感、1550nm比1310nm单位长度衰减更小、1310nm比1550nm测得熔接或连接器损耗更高。为此，光纤测试应与系统传输的波长相同，这意味着1550nm光系统需选择1550nm的波长。

3.1.2 脉宽

脉宽控制OTDR注入光纤的光功率，脉宽越长，动态测量范围越大，可用于测量更长距离的光纤，但长脉冲也将在OTDR曲线波形中产生更大的盲区；短脉冲注入光平低，但可减小盲区。脉宽周期通常以ns来表示，也可根据公式(4)用长度单位(m)来表示。例如100ns脉冲可以解释为“10m”脉冲。

3.1.3 测量范围

OTDR测量范围是指OTDR获取数据取样的最大距离，此参数的选择决定了取样分辨率的大小。测量范围通常设置为待测光纤长度1~2倍距离之间。

3.1.4 获取时间

由于后向散射光信号极其微弱(大约每米100光子)，一般采用统计平均的方法来提高信噪比，获取时间越长，信噪比越高。理论上，平均时间(或次数)对信噪比的改善可用下式表示⁽¹⁾，

$$SNIR = 10\lg \sqrt{N} \quad (6)$$

其中 SNIR 代表动态增益，N 代表平均次数。例如，3 分钟的获取将比 1 分钟的获取提高 0.8dB 的动态。但超过 10 分钟的获取时间对信噪比的改善并不大。

3.1.5 光纤参数

光纤参数的设置包括折射率 n 和后向散射系数 η 的设置。折射率参数与距离测量有关，后向散射系数则影响反射与回波损耗的测量果。这两个参数通常由光纤生产厂家

给出，对于大多数种类的光纤来说，表 2 给出的折射率和后向散射系数可以得到较为准确的距离和回损测量结果。

模式	多模		单模	
	850nm	1300nm	1310nm	1550nm
折射率	1.477	1.4719	1.4680	1.4685
散射系数	-62.3	-69.7	-80.3	-82.3

表 2

3.2 数据获取

参数设置好后，按开始键，OTDR 即可发送光脉冲并接收由光纤链路散射和反射回来的光，每隔一定的时间(即取样时间间隔)就对光电探测器的输出取样，所有取样点的连线通过平滑处理构成了该光纤链路的 OTDR 曲线。

3.3 曲线分析

大多数现代 OTDR 可进行全自动测量而很少用户介入。这种情况下，OTDR 自动探测和测量所有事件、段和光纤终结，并以图形和列表的形式给出测量结果。但有时需要操作者对 OTDR 曲线进行手动分析。

距离和段长：距离和光纤段长测量的准确性很大程度上取决于光标的正确置位，精确定位光标时，需扩展窗口，使窗口能显示更多的细节。测量事件的位置，只需将光标 A 置于事件前缘开始，如图 5(a)所示；如要测量两事件的距离，则将光标 A、B 分别置于事件前缘开始，如图 5(b)所示。位置、距离测量的结果将直接显示在屏幕上。

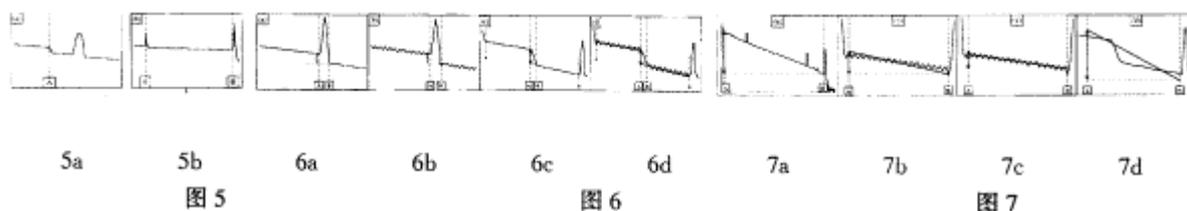
事件损耗：事件损耗包括反射事件和非反射事件损耗的测量。有两种手动测量事件损耗的方法：两点法和 LSA 法。

两点法：置两光标 A、B 于待测事件前、后缘线性电平之上，事件损耗就是这两光标处后向散射曲线电平之差，如图 6(a)所示。然而这种方法的准确性受限于曲线平滑度以及使用者正确置位光标能力，如图 6(b)所示。

LSA 法：置光标 A、B 于待测事件前后缘线性电平之上并尽量靠近待测事件，光标 a、b 于待测事件两边线性电平之上并尽量往两端延伸，但绝对不能包括任何明显的事件，如图 6(c)所示，仪表通过 LSA(最小二乘近似)法计算出光标 A、a 之间及光标 B、b 之间的 LSA 线，两 LAS 线的延长线在光标 A 上的截距即为该事件的损耗。有些 OTDR 只需将光标 A、B 定位于待测事件前后缘线性电平之上并尽量靠近待测事件，按 LSA 键，仪表自动按照 LSA 法计算出结果。与两点法相比，当曲线含有噪音时，五点法的测量更准确，如图 6(d)所示。

光纤段损耗：手动的光纤段损耗测量也有两种方法：两点法和 LSA 法。其中两点法测量与事件损耗测量相似，两点法用于测量含有明显事件的光纤段(如含有反射和非反射事件的光纤链路)损耗，如图 7(a)所示。对不含明显事件且多噪音的曲线，两点法则不够准确，如图 7(b)所示。

LSA法是测量不含有明显事件光纤损耗的最好方法，特别适合于含有噪音的曲线，如图7(c)所示。与五点法测量事件上损耗一样，LSA法测量包含有明显事件的光纤段将引起严重的错误，如图7(d)所示。



反射与光回波损耗：事件的反射R是在光纤链不连续点上反射功率 P_r 与入射功率 P_i 之比，

$$R = 10 \lg \frac{P_r}{P_i} (dB) \quad (7)$$

其值为负。较大的反射在波形曲线上显示为较高的峰。反射大小依赖于连接器、断点和机械连接界面的清洁度、平整度以及折射率差异。理想的光纤/空气界面的反射为-14dB，常用的PC连接器反射为-30至-50dB之间，而APC连接器的反射更小，只有-60至-70dB。测量反射的具体操作各有不同，一般可通过置一个光标于反射的正前位置，另一个光标置于反射顶，按控制面板上合适的按钮可自动测量反射。

光回波损耗(ORL)代表入射光功率 P_i 与从整个光纤链返回的所有反射光功率 P'_r (包括光纤本身后向散射光及所有连接和终结的反射光功率)之比，

$$ORL = -10 \lg \frac{P'_r}{P_i} (dB) \quad (8)$$

对一给定的系统，如果ORL过小，则反射回来的光将影响激光器的正常运行，并最终影响探测器对信号的正确解码能力。OTDR可测量光纤链路总的ORL，有的OTDR还可测量光纤链路任意两点间的ORL，测量时，只需按相应的键，自动显示光标A、B间的ORL。

4 经验与技巧

4.1 接头清洁

不清洁的连接器导致测量不可靠、曲线多噪音甚至使测量不能进行，它还可能损坏OTDR。要获得精确的、可重复的测量，光系统内所有物理连接点清洁极为重要，单模光纤的模场直径不到 $10 \mu m$ ， $50 \mu m$ 直径的尘粒有可能完全中断光传输。即使遮拦5%的光传输区域，也会增加0.22dB的插入损耗。

避免用酒精以外的其它清洗剂或折射率匹配液，因为它们可使光纤连接器内粘合剂

溶解。如不可避免地要用折射率匹配液，则要用专用于光纤连接器的特殊匹配液。

4.2 熔接增益

不同模场直径或不同后向散射系数的光纤的熔接，在OTDR曲线上可能会产生一正增益，这一正增益是由于在熔接点之后的光纤比熔接点之前的光纤产生更多的后向散射光而形成的。事实上，光纤在这一熔接点是熔接损耗的，因此，需要在两个方向测量并对结果取平均作为该熔接损耗。

4.3 鬼影

在OTDR曲线上的尖峰有时并不是有真正的连接器或断点引起的菲涅耳反射峰，而是由于离入射端较近且强的反射引起的回音，这种尖峰被称为鬼影⁽³⁾，如图8所示。入射光脉冲在两个连接器1、2之间来回反射，使得在OTDR曲线的G1处产生一个尖峰(鬼影)，图8中终结强反射还可以引起鬼影G2。有两个特征可用于识别鬼影：曲线上鬼影处未引起明显损耗；沿曲线鬼影与始端的距离是强反射事件与始端距离的倍数。

可通过以下方法消除鬼影：在强反射处使用折射率匹配液以减小反射、选择短脉冲宽度以减小注入功率、在强反射之前的光纤中增加衰减。如果引起鬼影的事件位于光纤终结，可绕合适的工具(如铅笔)几圈以衰减反射回始端的光而得到消除鬼影的目的。

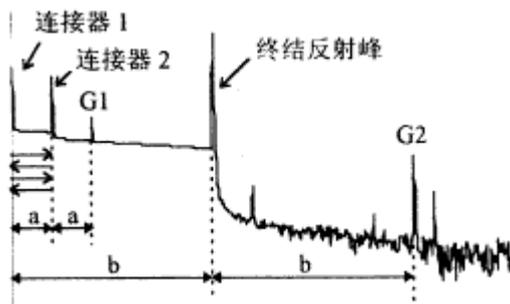


图8 鬼影的形成

4.4 折射率与散射系数的校正

就光纤长度测量而言，折射率系数每0.01的偏差会引起每公里7米之多的误差，对于较长的光纤段，应采用光缆制造商提供的折射率值。如果折射率系数未知，但一段相同种类光纤的长度已知，那么可以将光标放在已知长度的光纤末端，并调整折射率系数直至测得的两点距离符合已知距离，则折射率系数就可以计算出来了。工程中，为了施工和抢修的方便，提出光缆折射率，它是把光缆绞缩率或光纤余长考虑在内的折射率，可以帮助测试人员快速测试光缆皮长。

如果需要精确测量光纤段的回波损耗或连接器的反射，需采用光缆制造商提供的散

射系数值。若散射系数未知，但在一条类似的光纤中也存在反射且回波损耗已知，那么相应的散射系数可以通过下述方法获得：对已知反射进行回波损耗测量，调节散射系数直至测量的回损值符合已知的回损值。

需要注意的是，当将距离测量和以前对同一光纤段的测量进行比较时，应使用同一个折射率系数；当把一个回损测量值与先前对同一光纤连接所测的回损值进行比较时，应使用同一个散射系数。

4.5 过渡光纤的使用

过渡光纤是一段用于连接OTDR与待测光纤、长300~2000m的光纤，其主要用处为：前端盲区处理和终端连接器插入损耗测量⁽⁴⁾。

一般来说，OTDR与待测光纤间的连接器引起的盲区最大。在光纤实际测量中，有时为避免这一大的前端盲区淹没待测光纤开始一段内的细节，在OTDR与待测光纤间加接一段过渡光纤，使前端盲区落在过渡光纤内，而待测光纤始端落在OTDR曲线的线性稳定区。过渡光纤的长度视具体情况而定。

光纤系统终端连接器插入损耗可通过OTDR加一段过渡光纤来测量。如要测量首端连接器的插入损耗，可在OTDR与待测光纤首端加一过渡光纤；如要测量首、尾两端连接器的插入损耗，可在每端都加一过渡光纤。

过渡光纤的特性应与被测光纤一致，且连接器应是高质量的。

4.6 超长中继测量

当光纤线路损耗在OTDR动态范围内时，一般应对两个方向各测一次，每个方向的测试曲线应包括全部长度的完整曲线。对超长中继段，当其线路损耗超出OTDR的动态范围时，可从两个方向测至中间（中间汇合点不应落在接头位置，且两个方向的测量距离各为全程的一半左右），曲线记录时，移动光标至“合拢处”的汇合点，使显示数据长度相加值为中继段全长，损耗值相加即为中断段线路损耗。此方法虽未全部双向测量，但实际统计分析表明，由于中继段是由很多光缆连接而成，方向误差虽自然平衡状态，两个方向各测一半，其结果与由中间分两段双向测量的统计值基本一致。
