

A nighttime photograph of a city street with light trails from cars and buildings in the background. The text is overlaid on a dark horizontal band across the middle of the image.

高比特率时的色度色散

EXFO

本袖珍指南从概念到测试全面地介绍了色度色散。

人们在应对色度色散方面投入了大量的时间、人力和金钱。但为什么需要这样？随着带宽需求和传输速率迅猛增长，未来又将如何？

我们需要面对这个事实：有时很难紧随最近的趋势和解决方案，尤其当网络元件不断发展，光纤类型不断增加而发射器和接收器也不断变化时更是如此。本指南就是为此而编制。

它探讨了色度色散引起的担忧和代价。它还讨论了不同的传输格式、补偿方案以及各种光纤、传输技术和传输速率的影响和不足。此外，本指南还探讨了市场上最常见的测试技术并讨论了拉曼放大器的部署。

目录

1. 色散相关的传输损伤	2	7.5 相移键控调制技术的变形—NRZ-DPSK调制格式 ..	30
2. 色散现象的规定	4	7.6 相移键控调制技术的变形—载波抑制归零调制格式 ..	31
3. 发射器光源特性	5	7.7 相移键控调制技术的变形—双二进制调制格式	32
4. 光纤色散规格	6	8. 色度色散测量	37
5. 色度色散导致的脉冲展宽	12	8.1 数据拟合	38
5.1 最大允许色散	11	8.2 CD测试方法	39
5.2 最长可达距离	14	8.2.1 测试方法—一般要求	40
6. 色散损伤和补偿	16	8.2.2 相移法	40
6.1 色散补偿	19	8.2.3 现场测试相移法的改进	43
6.2 WDM系统中的色散补偿光纤	20	8.2.4 差分相移法 (DPSM)	45
6.3 最大CD偏差	23	8.2.5 时域法中的光谱群延迟	46
6.4 WDM系统: 剩余CD容限	24	9. 相干系统中的色度色散测试	51
7. 调制及其对色度色散的影响	25	9.1 拉曼增益	52
7.1 调制器影响	25	9.2 了解有效面积	53
7.2 NRZ-OOK调制格式	26	9.3 CD测试	54
7.3 RZ-OOK调制格式	27		
7.4 PSK调制格式	28		

1.色散相关的传输损伤

对距离和带宽的需求不断增长，促使甚高比特率（VHBR）（如40 Gbit/s和100 Gbit/s）也相应发展。然而，这些高速率很容易受到色度色散（CD）的影响，并需要仔细监测。如图1所示，当发射器（Tx）发射的光脉冲在光纤内沿着传输通道传输时，受CD影响会出现展宽效应。如图2所示，这种展宽效应会导致码间干扰（ISI）。当这种展宽非常严重，使得两个脉冲相互重叠时会出现ISI，从而将0变成1。



图1—脉冲展宽

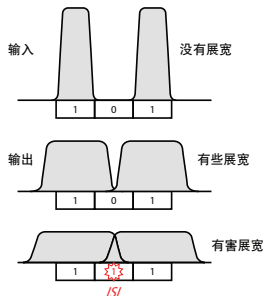


图2—脉冲展宽导致的码间干扰（ISI）

如图3所示，改善CD的方法之一是缩短工作周期（即在比特周期内缩短脉冲持续时间），但这需要付出一定的代价：展宽信号频谱会降低平均脉冲功率，从而使光信噪比（OSNR）恶化。因此，要维持相同的OSNR，必须增加脉冲功率。然而，这样做可能会导致非线性效应（NLE），这些效应对高功率尤为敏感。

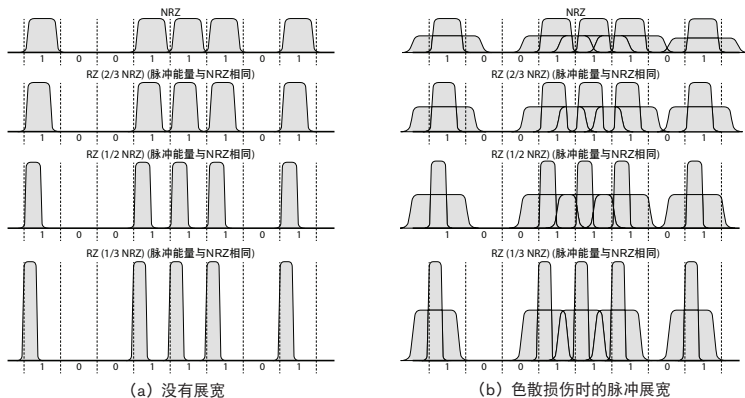


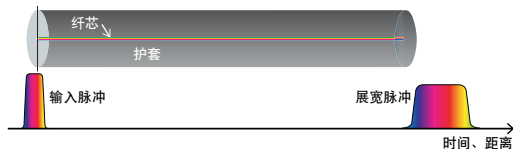
图3—NRZ和RZ格式的光脉冲与相应比特流（脉冲能量不变）

2.色散现象的规定

有三种不同的色散：

- 模间或多模色散
- 模内或单模色度色散（CD）
 - 材料色散
 - 波导色散
- 偏振模色散（PMD）

色度色散如图4所示。结果显而易见：信息的输入脉冲在通过光纤或其它色散介质传输时会展宽。



备注：调制的单模激光的不同波长（由不同颜色决定）在单模光纤内以不同速度传输。

图4—单模光纤的模内色度色散

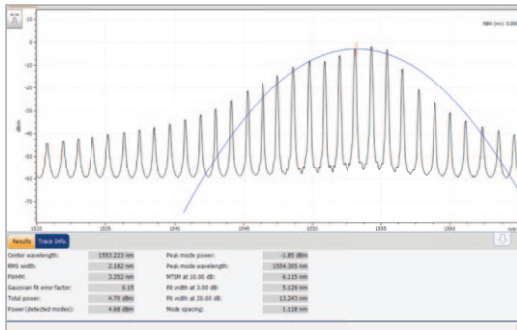
这三种色散中，在进行单模光纤（SMF）传输时，CD造成的损伤最严重，而PMD则最难以预测和解决。前者被认为是确定性现象，而后者为随机现象。

之所以会出现色度色散，是因为Tx光源发射的不同波长/频率的光在色散介质中会以不同的速度进行传输。

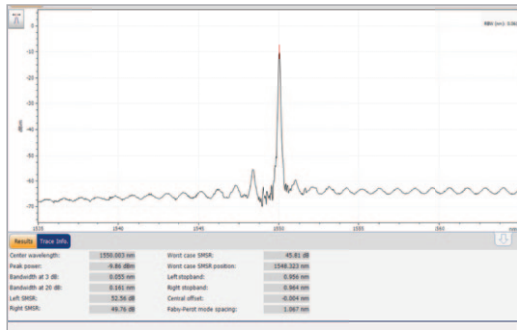
3.发射器光源特性

所有光源都有一个特定的非零波长谱或频谱，其波长或频率不会以相同的速度从输入端向输出端传输。每个波长或频率在传输链路（如光纤、光器件或放大器）中的折射率（IOR）也各不相同。色度色散是光纤的折射率随频率或波长发生改变的结果。

图5显示了法布里-珀罗（FP）和分布式反馈（DFB）激光器的波长谱；它们是在电信单模光纤上使用最广泛的两种光源。



(a) 1550-nm区域内的法布里-珀罗激光器光谱



(b) 1550-nm区域内的分布式反馈激光器光谱

图5—光纤通信行业使用的典型光源的波长谱

因为存在IOR，来自光源的不同波长的光不会以相同的速度（群速度）传输，结果在不同的时间到达光纤末端。在这种介质中传输的脉冲会出现扩散和色散效应，从而限制了传输带宽。

4. 光纤色散规格

不同波长速度的变化，更重要的是这种变化的速度（CD本身）不呈线性，使得脉冲展宽在某些波长上比在其它脉冲上更严重。表1至表4描述了ITU-T建议标准中规定的电信光纤的规格。

表1—G.652、G.653和G.654光纤上的典型色度色散规格

ITU-T 建议标准		G.652	G.653			G.654		
光纤类型参数		A/B/C/D	A	B		A	B	C
$\lambda_{0, \min}$	nm	1300	1500	--	--	--	--	--
$\lambda_{0, \max}$	nm	1324	1600	--	--	--	--	--
λ_{\min}	nm	--	1525	--	--	--	--	--
λ_{\max}	nm	--	1575	--	--	--	--	--
λ_{range}	nm	--	--	1460-1525	1525-1625	--	--	--
$D_{\min, \lambda_{\text{range}}}$	ps/nm-km	--	--	$[0.085 \cdot (\lambda - 1525)] - 3.5$	$3.5 \cdot (\lambda - 1600) / 75$	--	--	--
λ_{range}	nm	--	--	1460-1575	1575-1625	1550		
$D_{\min, \lambda_{\text{range}}}$	ps/nm-km	--	--	$3.5 \cdot (\lambda - 1500) / 75$	$[0.085 \cdot (\lambda - 1575)] + 3.5$	+20	+20	+20
$S_{0, \max}$	ps/nm ² -km	0.092	0.085	--	--	--	--	--
$\lambda(S_{\max})$	nm	--	--	--	--	1550		
S_{\max}	ps/nm ² -km	--	--	--	--	0.070		
λ_{link}	nm	1550	--	$\lambda_{0, \text{typ}} = 1550$		1550		
S_{link}	ps/nm ² -km	0.056	--	$S_{0, \text{typ}} = 0.07$		TBD		
D_{link}	ps/nm ² -km	+17	--	--		TBD		

表2—G.655光纤上的典型色度色散规格

ITU-T 建议标准		G.655		
类型参数		A	B/C	
λ_{range}	nm	1530-1565		1565-1625
λ_{min}	nm	1530		TBD
λ_{max}	nm	1565		TBD
D_{min}	ps/nm-km	Lower ± 0.1	Lower ± 0.1	Lower $\pm \text{TBD}$
D_{max}	ps/nm-km	Upper ± 6.0	Upper ± 10.0	Upper $\pm \text{TBD}$
$D_{\text{min}} - D_{\text{min}}$	ps/nm-km	--	≤ 5.0	--
$\lambda_{\text{link, range}}$	nm	--	--	--
S_{link}	ps/nm ² -km	--	--	--
D_{link}	ps/nm ² -km	--	--	--

ITU-T 建议标准		G.655			
类型参数		D		E	
λ_{range}	nm	1460-1550	1550-1625	1460-1550	1550-1625
λ_{min}	nm	--	--	--	--
λ_{max}	nm	--	--	--	--
D_{min}	ps/nm·km	$[700 \cdot (l-1460)/90]-4.20$	$[2.97 \cdot (l-1550)/75]+2.80$	$[5.42 \cdot (l-1460)/90]+0.64$	$[3.30 \cdot (l-1550)/75]+6.06$
D_{max}	ps/nm·km	c	$[5.06 \cdot (l-1550)/75]+6.20$	$[4.65 \cdot (l-1460)/90]+4.66$	$[4.12 \cdot (l-1550)/75]+9.31$
$D_{\text{min}}-D_{\text{min}}$	ps/nm·km	--	--	--	--
$\lambda_{\text{link, range}}$	nm	可实现各种实施方案，旨在优化功率、通道间隔、放大器之间的距离、链路长度和比特率之间的平衡。这些实施方案主要不同之处在于允许的CD、CD斜率和非线性系数。			
S_{link}	ps/nm ² ·km				
D_{link}	ps/nm ² ·km				

表3—G.656光纤的ITU-T色度色散规格

ITU-T 建议标准		G.656		
参数				
λ_{range}	nm	1460-1550	1550-1625	
D_{min}	ps/nm-km	$[2.60 \cdot (\lambda - 1460) / 90] + 1.00$	$[0.98 \cdot (\lambda - 1550) / 75] + 3.60$	
D_{max}	ps/nm-km	$[4.68 \cdot (\lambda - 1460) / 90] + 4.60$	$[4.72 \cdot (\lambda - 1550) / 75] + 9.28$	
$\lambda_{\text{link, range}}$	nm	1460	1550	1625
S_{link}	ps/nm ² -km	TBD	TBD	TBD
D_{link}	ps/nm-km	--	TBD	--

表4—G.657光纤的色度色散规格

ITU-T 建议标准		G.657		
光纤类型参数		A	B	
$\lambda_{0, \text{min}}$	nm	1300	TBD	
$\lambda_{0, \text{max}}$	nm	1324		
$S_{0, \text{max}}$	ps/nm ² -km	0.092		

图6显示了光纤上不同波长对应的色度色散。

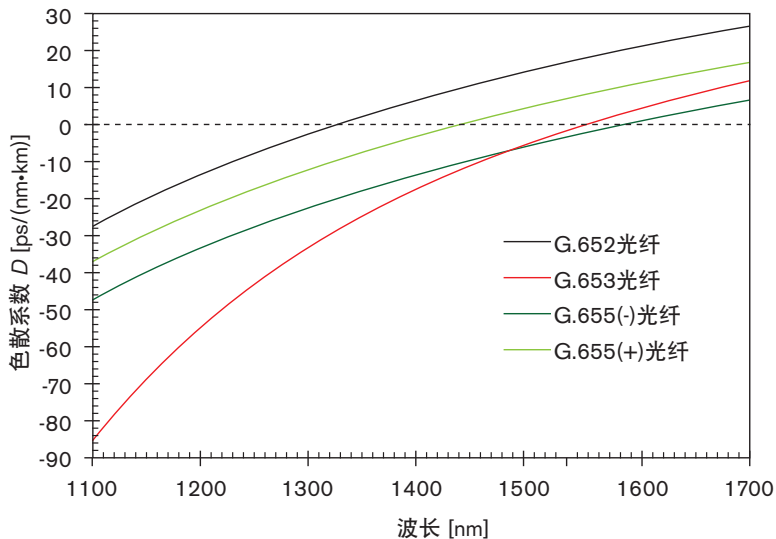


图6—各种标准单模光纤的色度色散

5.色度色散导致的脉冲展宽

从Tx，CD造成的脉冲展宽由以下原因造成：

- 光源的光谱内存在不同的波长。每个波长具有不同的IOR，造成光纤上出现不同的相位延迟和群延迟。
- 光源调制导致两个效应（展宽/收缩）：
 - 当光源波长谱在脉冲期间发生变化时会出现啁啾，尤其在其上升沿和下降沿处。脉冲末端的波长与起始端相比，会出现延迟，从而导致展宽。但如果这种延迟与光纤的CD RGD相反，也可能会出现脉冲收缩。啁啾效应如表5所示。

表5—啁啾对色散和脉冲展宽的影响

可在下列假设场景中考虑色度色散对光源光谱和Tx调制宽度的影响：最大允许色散和最长可达距离。

啁啾正负	脉冲内的波长漂移方向		(啁啾 x 色散) 乘积正负效应	
	脉冲上升时间	脉冲下降时间	+	-
+	朝较短波长	朝较长波长	脉冲展宽	脉冲收缩至最小，然后展宽
-	朝较长波长	朝较短波长	脉冲收缩至最小，然后展宽	脉冲展宽

5.1 最大允许色散

对于每个功率代价和BER来说，CD展宽导致允许的ISI都有一个上限。当最大脉冲展宽等于部分输入脉冲比特周期或脉冲占据的时隙时，达到允许的最大ISI。

表6—各种NRZ脉冲谱宽和功率代价的最大允许色散

功率代价 (dB)	0.5	1	2
B [Gbit/s]	$(D \cdot L)_{\text{Max}}$ [ps/nm]		
2.5	47126	18468	29731
10	794	1193	1920
40	50	75	120
100	8	12	19

在表6中，当NRZ脉冲频谱变窄时，尤其在比特率较低时，最大允许色散会增加。在比特率较高时，因为最大允许色散变得极小，所以脉冲谱宽的影响基本消失。此时，剩余色散和色散调节变得非常关键。

5.2 最长可达距离

当典型光纤的色散已知时，以上数据可用来计算最长可达距离。

表7—各种NRZ脉冲谱宽和光纤的最长可达距离

L_{Max} [km], PISI = 1 dB	D(1565 nm) [ps/nm.km]		
光纤类型	G.652	G.653	G.655
B [Gbit/s]	18.7	1.4	9
2.5	970	12940	2013
10	63	836	130
40	4	52	8
100	0.6	8	1.3

如表7所示，在比特率较高时，如果没有严格的色散补偿和/或不同的传输机制，很难传输较长的距离。

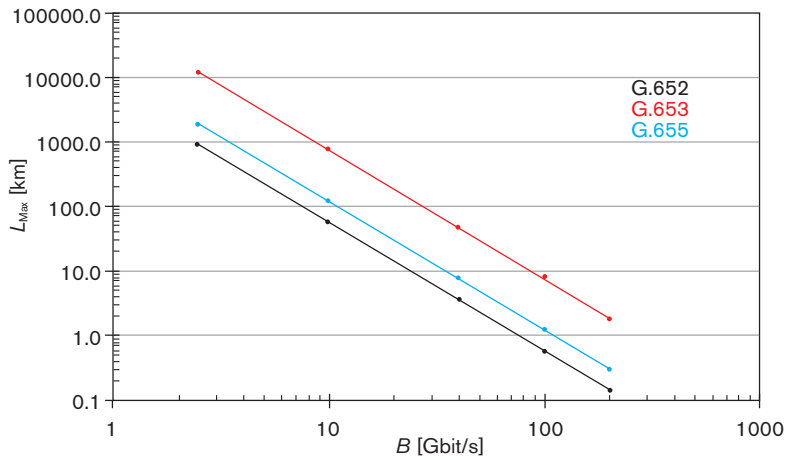


图7—表7中随比特率变化的最长可达距离

6. 色散损伤和补偿

如果链路由多个光纤段组成，图8所示的情景会在每个光纤段上重复出现。如图9所示，在每个光纤段节点，提供的色散可直至接收端，在这儿采用一定剩余值进行最终补偿。

因此，必须采用相等的负色度色散来补偿色度色散（针对ITU-T G.652型光纤）（如图9所示）。

在非WDM系统中，在接收端进行补偿；而在WDM系统中，通常在放大器（参见图10至图12）和接收端进行补偿。

图11显示了在密集波分复用（DWDM）系统中，在接收端采用静态CD补偿模块（DCM）与嵌入式EDFA。该示例显示了一种静态CD补偿方案，即为DCM添加一个固定值的负CD。该方案尤其适用于OC-192/STM-64或更低线路速率时的CD补偿。对于比特率较高的系统，必须在DWDM复用器内的每个接收端采用动态CD补偿方案（如图12所示）。

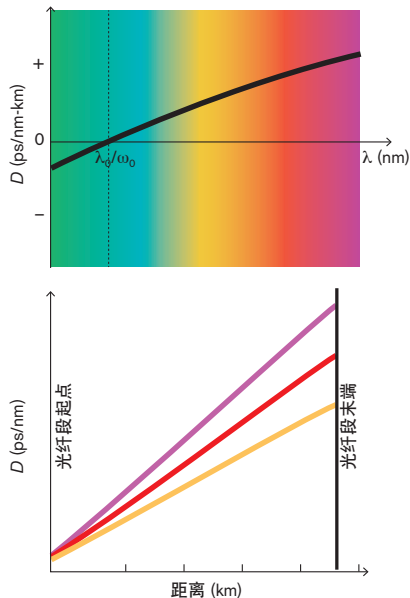


图8—色度色散中频谱和距离变化之间的关系
(在该示例中，使用了3个WDM通道)

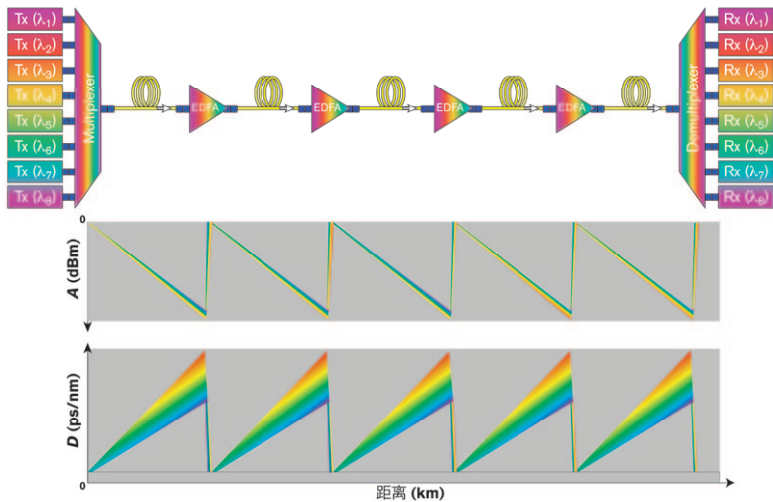


图9—WDM系统中，不同距离对应的衰减、色度色散和补偿；在放大器内使用色散补偿光纤

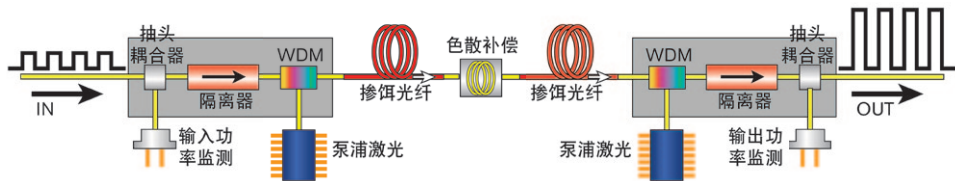


图10—放大器（EDFA）内色散补偿模块的位置

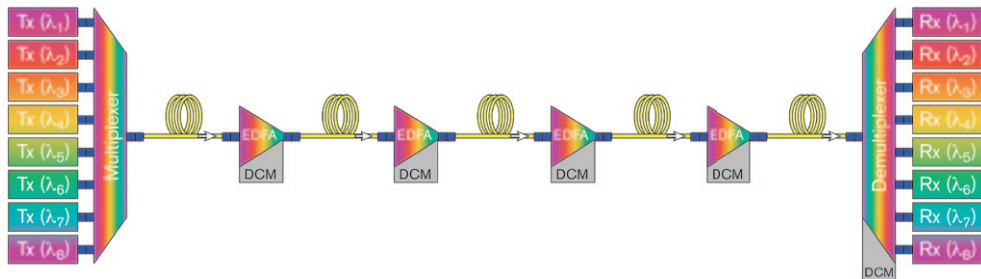


图11—DWDM系统中使用的色散补偿模块

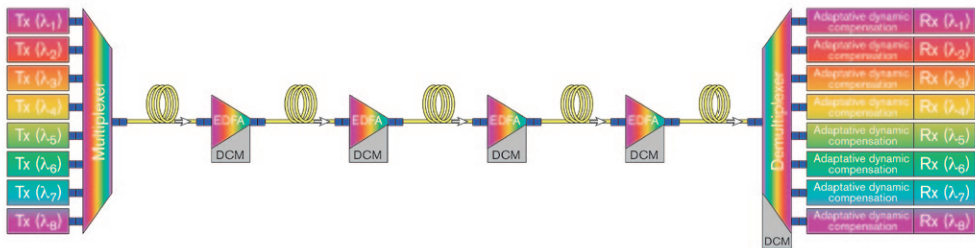


图12—DWDM系统内静态和自适应动态色散补偿

6.1 色散补偿

有多种主动或被动的CD补偿方法：

(1) 被动CD补偿技术

- › CD补偿光纤 (DCF)
- › 光纤CD映射
- › 光纤布拉格光栅 (FBG)
- › 高阶模 (HOM) 光纤
- › 虚像相位阵列 (VIPA)
- › 支持CD的传输，如CD映射
- › 多孔光纤

(2) 主动CD补偿技术

- › 非线性效应 (NLE) 以及非线性调节的传输，如光孤子传输
- › 预调节，如预啁啾
- › 电子信号处理
 - › 相位校正
 - › 决策层反馈
 - › 前向纠错 (FEC)
- › 光谱反转 (即通常在系统中间反转光谱成分)

6.2 WDM系统中的色散补偿光纤

为显示色散补偿，我们可以看看WDM系统及其对使用DCF进行的CD补偿的响应。该系统包括：

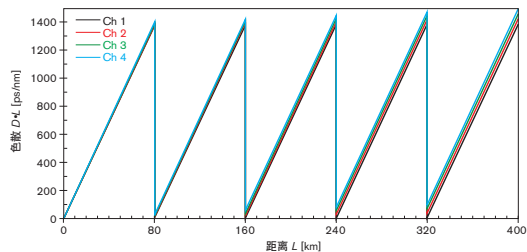
- › WDM通道数：4
- › 通道间隔：200 GHz
- › 调制格式：无啁啾NRZ
- › 链路距离：400 km
- › 嵌入式放大器和DCF位置：每隔80 km

表8—通道规划的色散值和斜率示例

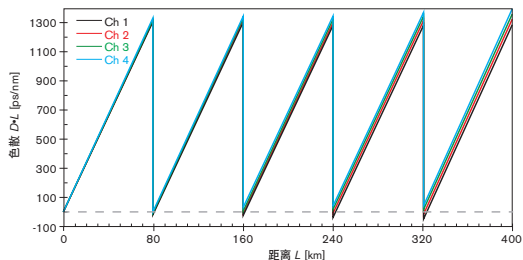
通道数	ν (THz)	λ (nm)	D for λ_0 [ps/(nm•km)]				$S = dD/d\lambda$ [ps/(nm ² •km)]
			D (1300 nm)	D (在中点)	D (1324 nm)	% Δ	
1	193.500	1549.31503	+18.166	+17.488	+16.810	4%	0.05906
2	193.300	1550.91804	+18.258	+17.583	+16.907	4%	0.05892
3	193.100	1552.52438	+18.351	+17.677	+17.004	4%	0.05877
4	192.900	1554.13405	+18.443	+17.772	+17.101	4%	0.05862
DCF	--	--	--	-80	--	--	-0.2
G.652	--	1550	--	+17	--	--	0.056

选用DCF是为了提供准确的补偿；首先在通道1，然后在通道3上。

图13 (a) 显示了CD从一个链路段向另一个上逐渐增加，直至链路末端，此时在通道1上提供准确的补偿。图13 (b) 与图13 (a) 基本相同，除了在通道3上提供准确的补偿。



(a) 0.2 ps/nm时通道1的补偿



(b) 0.2 ps/nm时通道3的补偿

图13—为单通道提供补偿时色散不断增加

虽然CD和DCF斜率的值固定，但波长的值却不同（如表8所示）。这意味着每个通道上出现的CD各不相同，提供的补偿也不相等。每个通道的剩余CD随着距离增加而上升。

图13代表两种补偿方案；显示了当向通道1和通道3提供准确的补偿时，只有剩余CD（不是CD值）随着每个通道的距离增加而上升。虚线表示每个通道的总链路CD补偿。这意味着存在一定水平的CD时，通道在不出现CD损伤的情况下，将无法继续传输任何信号。被补偿通道每个链路段的CD值被设定为0.2 ps/nm（CD补偿不能为零色散）。

考虑到允许的最大剩余CD值，在功率代价为1-dB时，因为最大剩余CD，通道4的传输距离不会达到80 km。事实上，如果向通道1提供准确的色散，因为功率代价为2-dB，通道4上的信号传输距离很难达到100 km。如果在通道3（大致为通道方案的中间）提供准确的色散，这种情况会有所好转。当功率代价为1-dB时，通道1的传输距离将受到限制，最长仅为100 km，而其它通道的传输距离最长可达200 km。当然，在链路末端接收器前面使用后适应补偿技术时，情况会有所改善（如图12所示）。

虽然DCF为固定波长的CD提供准确补偿，但CD并未优化，因此不能补偿光纤斜率，最终无法帮助提高系统性能。

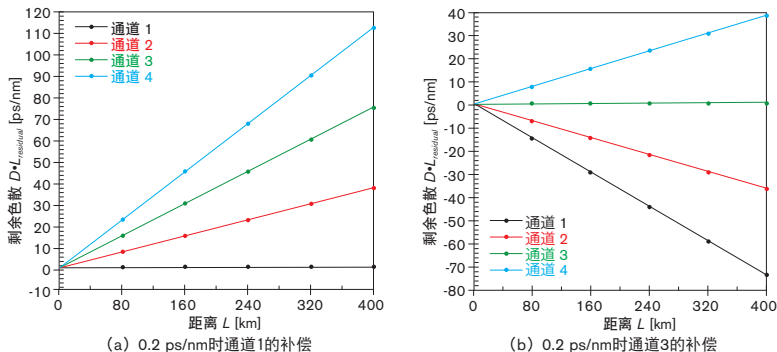


图14—4通道方案中的剩余色散

6.3 最大CD偏差

在甚高比特率传输系统中，色度色散偏差也是重要的参数，必须在进行CD补偿时予以考虑。在安装时，测得的光通道CD值用于确定Rx内色散补偿的大小。在安装后，光通道的实际CD值和Rx内的实际色散补偿大小始终要低于最大剩余CD。

最大CD偏差指光通道（从Tx到Rx）的实际CD值和安装时确定的通道CD值之间允许的最大差值。

在采用不归零（NRZ）和归零（RZ）调制时，以及在不同的RZ工作周期内，该值会有所不同。

在甚高比特率系统中，具体规定可容忍的最大剩余CD非常困难，因为必须要考虑以下几个变量：

- Tx光功率输出
- 调制格式
- 嵌入式放大器增益和饱和功率水平
- 嵌入式放大器设计（泵浦数和级数）
- 补偿技术
- 链路距离
- 光纤类型

6.4 WDM系统：剩余CD容限

在WDM传输系统中，必须考虑光纤（和链路）的CD斜率，因为CD光谱变化是非线性的（即每个WDM通道的CD也不同）（如图6所示）。

每个WDM通道具有不同的CD值。

目前，很难找到也能补偿CD斜率的CD补偿设备（即采用宽带补偿设备来补偿DWDM通道方案中的每一条通道，以便获得不受规划波长影响的恒定CD值）。

因此，在WDM传输系统中使用DCF等宽带CD补偿设备时，DCF可能会为通道方案内的中心通道（或任何其它通道）提供准确的补偿，而旁边的通道可能会出现剩余CD。

在此处，可以估算每个通道接收器的最大允许剩余CD。这些值确定了通道数（N）、通道间隔和链路长度的极限。

当一些通道的剩余CD较大时，通过在解复用器后、接收器前提供更多补偿（自适应CD补偿模块），为每个通道提供最佳值，仍可能实现可接受的性能。在这些情况下，可调或固定的啁啾布拉格光纤光栅（CFBG）等技术会非常有用。

7.调制及其对色度色散的影响

7.1 调制器影响

为甚高比特率应用选择最经济高效的调制格式并非易事。这主要取决于调制器的类型、是否存在调制器啁啾以及调制格式。

有四种基本的信号特性，可用来产生调制：

- 幅度键控 (OOK)
 - 不归零 (NRZ)
 - 归零 (RZ)
 - 载波抑制归零 (CS-RZ)
 - 单边带归零 (SSB-RZ)
- 相移键控 (PSK)
- 频移键控 (FSK)
- 偏振移位键控 (PolSK)

将线性和非线性网络损伤保持在一定限度内，需要具备以下特性的强大调制格式：

- 具备窄通道间隔、利于DWDM传输并容许更高CD失真的窄光谱。
- 不容易受自相位调制 (SPM) 和交叉相位调制 (XPM) 等非线性效应影响的恒定光功率。
- 多信号电平，比二进制信号更有效，符号周期更长，从而减少CD和PMD引起的失真。

7.2 NRZ-OOK调制格式

图16显示了基于NRZ调制格式的比特流传输的相位和波形。NRZ通常基于开关键控（OOK）调制，对信号的强度进行了调制。当激光信号打开后，产生比特1，而激光关上时，产生比特0。



图16—NRZ格式传输示例

如图17所示，NRZ调制格式在时域内提供相对较宽的脉冲，光谱相应变窄。

在频率轴上，光谱并不宽（~60 GHz，FW90%M），但也不够窄，因此不能支持小于200 GHz的通道间隔。然而，宽NRZ脉冲并不利于很高的传输速率，且容易导致脉冲内出现相位暂时变化，从而造成CD损伤。VHBR NRZ光谱和脉冲宽度不容易支持具备很高CD容忍度的非常密集的WDM传输，尤其是在带CD补偿的放大系统中出现剩余CD时更是如此。

无损的VHBR传输通常要求较短的脉冲、足够OSNR和较窄的光谱，以便提供通道间隔来支持DWDM传输。很明显，这些都是理想要求；在现实情况中，必须有所取舍。因此，NRZ可能不是特别适用于甚高比特率传输，甚至更加不适用于DWDM传输方案。这意味着必须考虑其它的调制格式。

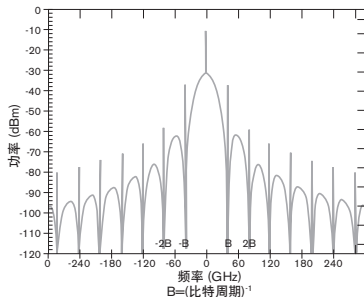


图17—VHBR NRZ传输光谱示例

7.3 NRZ-OOK调制格式

如图3所示，RZ调制比NRZ调制更受欢迎，因为RZ比特在其时隙中使用较短时间，因此能够提高接收器灵敏度。与NRZ光信号相比，RZ光信号能够更加容忍非线性效应。

RZ格式的这种特性使得比特1的脉冲宽度变得更窄，造成脉冲展宽，更能容忍CD，尤其是在带CD补偿的放大系统中出现剩余CD时更是如此。

然而，RZ信号与NRZ信号相比，其不利之处是工作周期缩短，这意味着在各自的光谱范围内，RZ信号的光谱更宽，每个脉冲的能量较低（如图18所示），从而提高了OSNR代价。提高峰值功率并不是解决之道，因为这可能会导致非线性效应，并因为通道间隔窄，从而限制DWDM传输。因此，标准的RZ不是VHBR传输的理想解决方案。

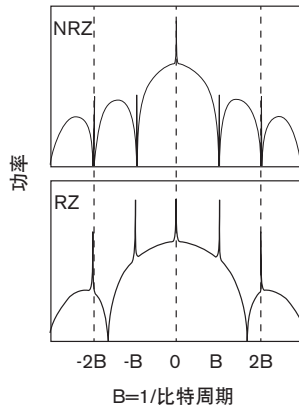


图18—较窄NRZ和较宽RZ调制格式的光谱差异

7.4 PSK调制格式

使用传输信号的波的相位及其幅度，有可能实现效率和容限更高的调制格式。这种方案称为相移键控（PSK）。如图19所示，改变调制器电压的极性会将波的相位响应从0变为 π （+180°）。为方便及简单起见，我们选择了 π 的相移。

通过将载波相位相对于前一个载波相位移动 π ，就会传输比特1；而将相位相对于前一个信令间隔内的相位移动为0或不移动，就会传输比特0。

在PSK中，每个比特的状态取决于前一个比特的状态。如果比特0跟随另一个比特0，则表示没有相位改变。如果出现两个连续的比特1，情况也同样如此。然而，如果在比特0后面出现比特1，这就意味着与前一个载波相位相比，后一个载波相位出现了180°或 π 的改变。如果比特1后面出现比特0，情况也同样如此。总之，如果波的相位不发生改变，信号状态也会保持原状（0或1）。当波的相位发生 π 的变化（即相位倒转）时，信号状态也随之改变。

图20显示了在NRZ-OOK传输中，与没有发生相位改变（0相位）相比，NRZ比特流出现相位改变的过程。

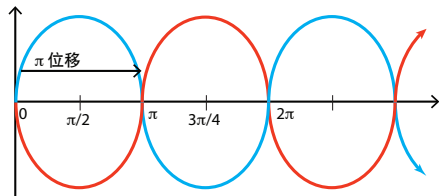


图19—从0至 π 的波的相移

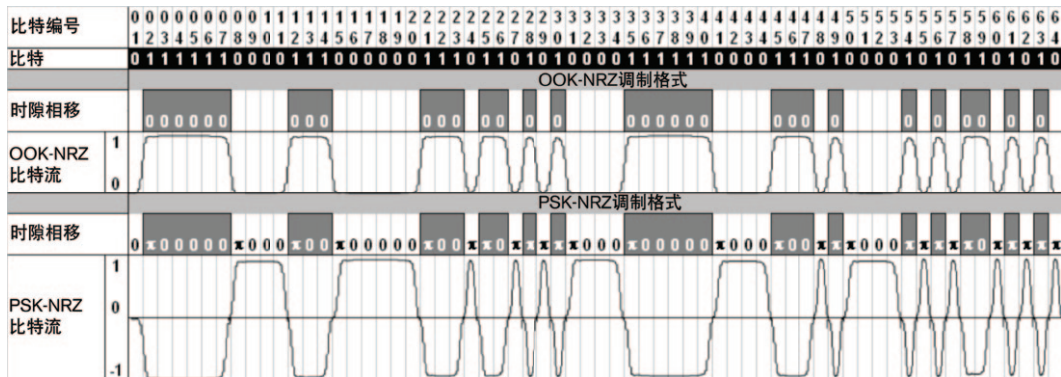


图20—应用于NRZ比特流的相移键控

如上图所示，即使在比特0时隙期间，调制器记录了波内出现相位改变，没有哪个比特会相继出现相同的相位改变。此外，该过程并不会影响脉冲幅度，因为激光始终保持打开的状态，从而将平均功率提高+3 dB。控制波的相位会正面影响CD，因为它也是一种与相位相关的现象。

这种技术也可与RZ工作周期格式结合使用，对峰值功率增加的影响较小，使脉冲内的能量保持不变，维持原先的OSNR，并控制峰值功率，从而避免出现非线性效应。

然而，缺点是需要不断改变调制器电压的极性；这么做会提高极性部分改变的风险，从而影响消息的完整性。该技术要求严格控制Tx激光和本地振荡器线宽。然而，也可以使用PSK方法的变形。

7.5 相移键控调制技术的变形—NRZ-DPSK调制格式

差分相移键控（DPSK）是一种用于VHBR传输的比较有发展前途的调制格式。在DPSK中，比特1在传输时，连续的1-1符号间出现 π 的相移。在连续的0-0符号间，不会出现相位变化。更重要的是，Tx保持偶数个比特0。在这种情况下，相位差决定比特值。图21显示了DPSK比特流。

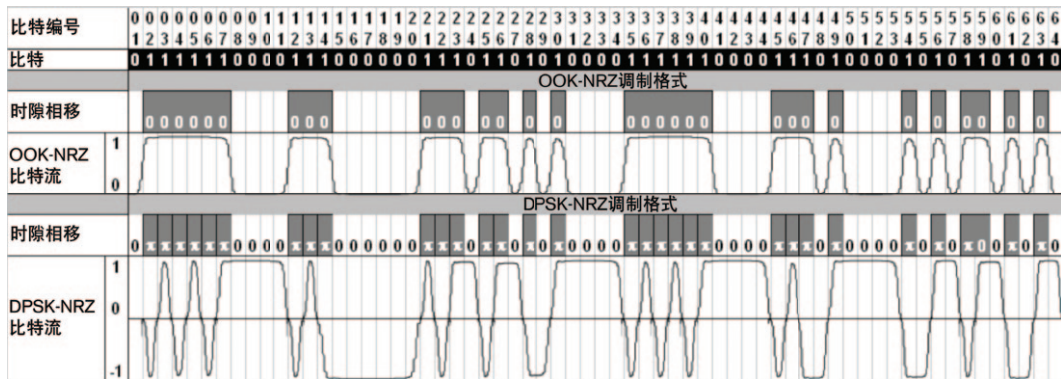


图21—应用于NRZ比特流的差分相移键控

RZ-DPSK是一种更好的格式，因为它的脉冲较窄，且保留了NRZ-DPSK的优点。

当去掉载波频率成分后，信号的最大功率组成部分也消失，从而提高了对非线性效应的容限。与此同时，与RZ谱宽相比，CS-RZ谱宽稍有减少（如图23所示）。

CS-RZ对CD的容限高于CS-RZ。另一个优点是当功率增加时，CD补偿的最佳值几乎始终不变，从而简化了链路设计。

尽管这种调制格式的实施相对简单、成本较低，但它的脉冲频谱会展宽，所以仍然会限制DWDM通道间隔。因此，在高密度或长距离路线上实施该技术目前仍不太可能。

7.7 相移键控调制技术的变形—双二进制调制格式

基于MZM的双二进制调制格式最初用来提高对CD的容限，因为它有助于将带宽变窄。

在双二进制格式中，不再持续改变调制器的极性来改变相位，相移取决于某个比特之前的情况。例如，如果某个比特1前面的比特0数为奇数，会出现 π 的相移（相对脉冲幅度 = -1）；而如果前面比特的数量为偶数，则不会出现相移（0相移，相对脉冲幅度 = 1）。在没有光脉冲或脉冲强度较低时，比特0始终被编码。

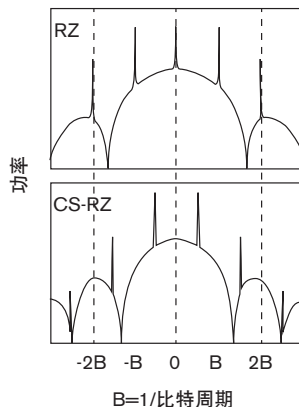


图23—较窄CS-RZ和较宽RZ调制格式的光谱差异

这种相位改变会使得脉冲谱宽变窄，并造成相反相位比特的CD出现破坏性的干扰，从而降低CD的效果（如图24所示）。

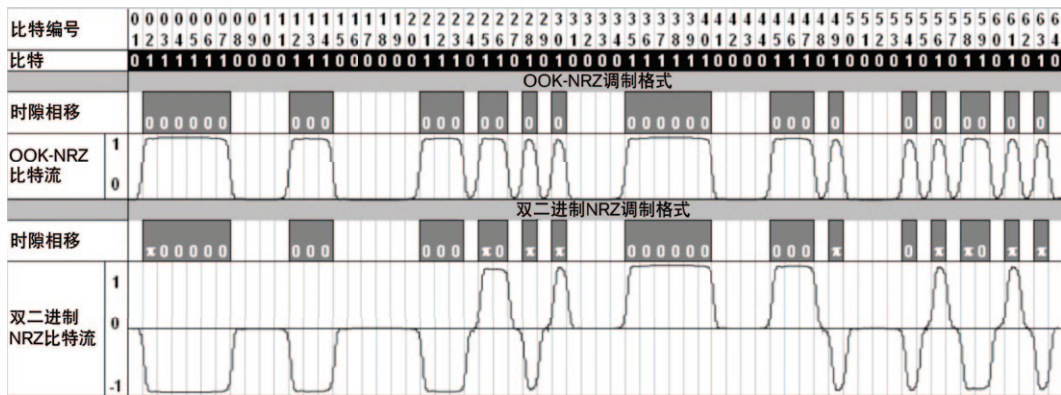


图24—NRZ比特流上双二进制调制格式内的相位变化

因此，调制器不必再像在PSK中一样来回切换。这意味着脉冲因时域和频域变化出现的失真较少。

如图24所示，当谱宽为~30 GHz，载波和边带被抑制时，在VHBR传输中，双二进制调制格式可支持最低为50 GHz的WDM通道间隔。从图25中可以清楚地看到，双二进制格式的光谱比NRZ的光谱窄。此外，双二进制格式的噪声水平比NRZ的低，从而也确保能够改善OSNR。

图26显示了各种调制格式的光谱。

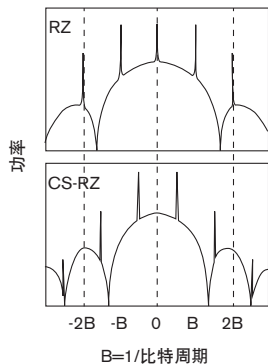
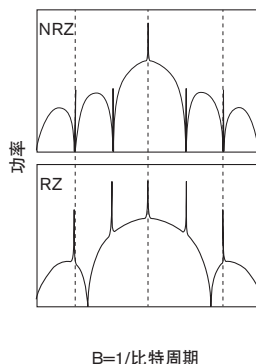
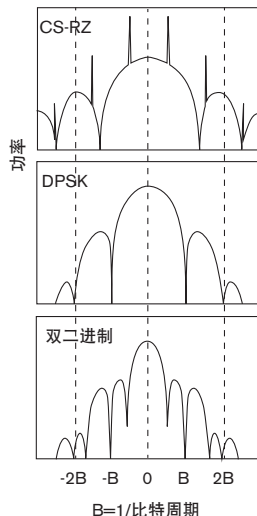


图25—OOK-NRZ和双二进制传输光谱的对比



B=1/比特周期



B=1/比特周期

图26—各种VHBR调制方案的对比

表9显示了图26中各种光谱的谱宽。

表9—各种VHBR调制格式中的谱宽差异

调制格式 FWXM (GHz)	NRZ	RZ	CS-RZ	双二进制
X = -40 dB	40	80	90	60
X = -60 dB	100	140	140	90
X = -70 dB	210	230	220	120

表10显示了不同系统厂商宣称的几种不同调制实施方案在100 Gbit/s传输时的极限CD容限。

表10—几种100 Gbit/s传输商业实施方案的CD容限

参数	100 Gbit/s	调制格式						
		OOK	PSBT	DPSK	QPSK	DQPSK	PM-QPSK	PM-DQPSK
频谱效率	bit/s/Hz	0.4	1	0.8	1.6	1.6	3	3
OSNR	dB in 0.1 nm RBW	20	20	17	15.5	18	15.5	18
色散容限	固有	--	--	--	--	--	--	--
PMD	ps	1	1	1	2	2	2.5	2.5
CD	ps/nm	15	50	12	35	35	140	140
复杂程度	技术	L	M	M	M	H	VH	VH
估计的距离	km	受光放大器噪声 (ASE) 限制						
相对成本	比OOK的增加数	--	1.1	1.2	1.5	1.7	1.9	2.1

8.色度色散测量

有两种情形需要测试CD：

- 实验室光纤和光缆测量，包括在研发、工程和制造期间进行测试，以及修理。
- 现场测量，包括在已部署的光纤和光缆上进行测试以便鉴定链路，从而将其升级至更高传输速率。

在这两种情况下，测量不同波长的群延迟；根据群延迟数据（不同波长）的导数来推断出CD、CD延迟和任意阶多项式。该导数通常通过将数据输入到数学模型中计算出来。这种方法非常有效，因为光纤的CD是十分确定的，因此可以很好地建立模型并预测。然而，当链路由具有不同CD特性（如CD、PMD、非线性）的不同部分组成时，这种方法未必适用于CD测量。

计算CD的基本方法有两种：第一种方法是将群延迟的曲线与波长拟合起来，从而找出拟合函数的导数。这种方法特别适用于数量较少的已知拟合函数，尤其是适用于光纤。

如果有不同类型的光纤，或如果某些部分导致的CD较高，最好的方法是在一个短波长或同时在两个相邻波长上使用延迟的局部导数来计算局部CD。

在准备实验设置时，必须抵消、校准或补充偏振效应。

8.1 数据拟合

有一种CD拟合模型提供了多种适用于各类光纤的拟合方程（如表11所示）。

表11—光纤规格和色散拟合

光纤类型	光纤分类	光纤规范			
		ITU-T建议标准	IEC标准		拟合
SMF	非色散位移	G.652 A/B	60793-2-50	B1.1	1550 nm区域：对于 ≤ 35 nm的间隔：二次方程式。对于 > 35 的间隔：5项Sellmeier或4阶多项式
		G.652 C/D	60793-2-50	B1.3	
	色散位移	G.653	60793-2-50	B2	
	截止位移	G.654	60793-2-50	B1.2	
	非零色散位移	G.655	60793-2-50	B4	
	非零色散位移宽带	G.656	60793-2-50	B5	

8.2 CD测试方法

现在有四种成为国际标准的CD测量方法：

1. 相移法（PSM）
2. 差分相移法（DPSK）
3. 时域法（OTDR法）中的光谱群延迟
4. 干涉测量法（INTY）

这些方法在ITU-T建议G.650.1和IEC标准60793-1-42中成为标准。

由于INTY的应用空间不同于其它几种方法，我们在此仅探讨PSM、DPSM和群延迟法。

8.2.1 测试方法——般要求

在这些方法中，光源的特性基本相同。光源可能如下：

- 激光：
 - 二极管激光阵列
 - 可调式激光 (TLS)
- 带选择波长滤波器的宽带光源 (BBS)：
 - SMF的拉曼增益，带Nd: YAG激光泵浦
 - 超级LED或LED
 - 放大自发辐射 (ASE)

可以将超级LED和ASE光源结合起来，发射C+L波段信号，用于光谱范围更广的测量。长光纤测试始终可以比短光纤测试能够更好地确保再现性。

8.2.2 相移法

如图27所示，PSM法使用经过调制的光源在不同波长时的相对相移。PSM法迅速、简单。如前所述，相对相移被转化为相对时间延迟，所得的光谱群延迟被拟合到为每种光纤定义的方程中。

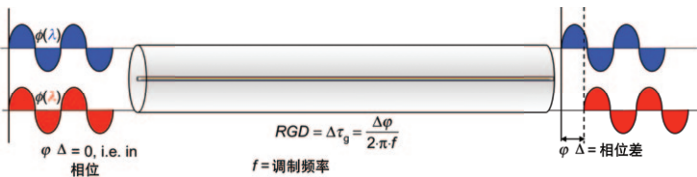


图27—相移法测量基础

可使用正弦、梯形或方形波调制，频率范围通常为30至100 MHz（尽可能高），光谱稳定性非常高。测量不确定度与调制频率成反比（频率最高时的不确定度最低）。

现场测试需要参考信号，它可以由被测光纤使用WDM或辅助暗光纤进行传输。在这两种情况下，PSM法非常麻烦且费用更高。参考信号应与调制信号相位锁定，而且可能源自调制信号。

PSM是EC和ITU-T中规定的SMF基准测试方法（RTM）。

图28显示了PSM实验设置。

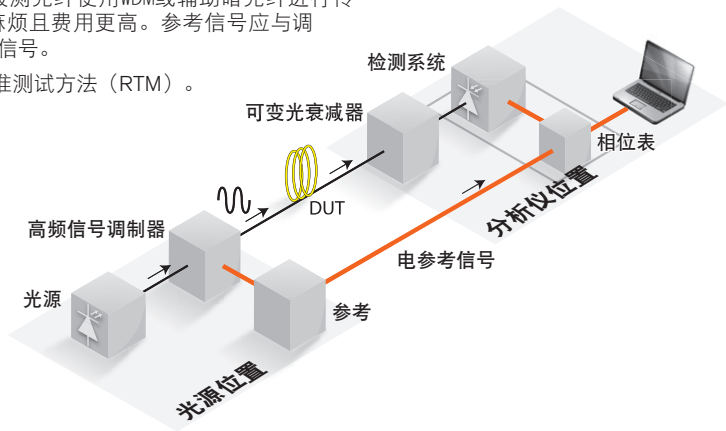


图28-PSM实验设置示意图

为RGD数据集采用最佳的拟合，然后可使用表11中所列的方程，根据拟合计算出色散。
图29和图30显示了使用PSM法获得的结果。

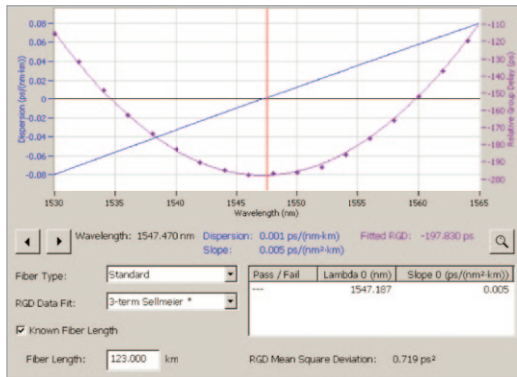


图29—G.653常规光纤PSM测试结果示例

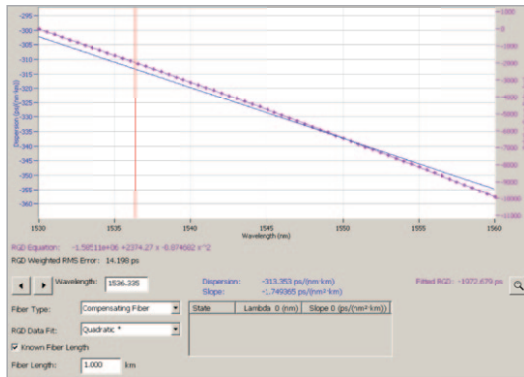


图30—DCF光纤PSM测试结果示例

在经过FUT后，宽带信号到达双通分立衍射光栅可调式滤波器。这种光滤波器会将信号分为两个或更多光通道。沿一条通道传输的光被过滤。这种过滤的波长可调。沿其它通道传输的光也被过滤，但按照固定的参考波长过滤（如图32所示）。

使用两条参考通道提高了延迟测量精度。测量的波长数量越多，CD结果就越准确。

到目前为止，大多数商用CD测量设备在被测光纤的输入端，而不是输出端选择光源波长。然而，在光源端使用波长选择器意味着接收器无法得知通过DUT发送的是哪个波长。这是该方法的一个不足之处，因为接收器和光源需要互相通讯，以便将波长数据和时间延迟数据转化为CD数据。因此，必须沿着光纤发回控制信号，以便通过光纤链路中可能存在的隔离器和EDFA等单向设备防止测量CD。使用环路中的另一条暗光纤（或其它通讯手段）可以解决此问题；然而，这种方法很麻烦，通常在现场测试期间不被接受。与此相比，上述经过改进的PSM方法在接收器一端安装波长选择器，不需要在光纤链路的两端之间进行任何通讯，这是因为调制的光源始终开着，并在其整个波长范围内进行传输。

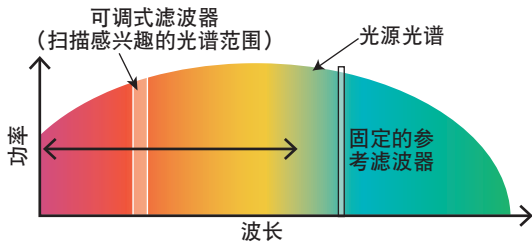


图32—改进PSM法中的波长扫描

经过改进的PSM法表明RGD（以及CD）可以精确测量。因此用于检测的电子设备也大幅精简，因为不需要控制或校准电子设备的信号相位。除了线性检测外，其它主要因素包括绝对波长不确定度和相对波长不确定度。为了获得正确的CD值，在整个可调式滤波器的带通上，光功率调制应保持不变，但事实并非如此，因为BBS存在光功率分布。随着它通过DUT，功率调制分布也发生改变。应测量这种分布，并用来计算被过滤光的确切中心波长，以便补偿功率调制线形。这种技术自然也适用于此类补偿。用来计算延迟的信号之一是过滤的可调式光功率调制信号。可在测量延迟的同时测量功率调制衰减曲线。这就使得能够补偿功率调制分布。

8.2.4 差分相移法（DPSM）

DPSM同时使用两个经过调制的光源波长，这两个波长被合并到被测光纤中。使用双检测系统来同时记录两个波长信号基本上是DPSM法与PSM法的唯一区别。图34显示了DPSM测试设置。

以一个波长从光纤出来的光的相位与以间隔很小的另一个波长从光纤出来的相位进行比较。两个波长间隔上的平均CD根据差分相移、波长间隔和光纤长度确定。差分相位测量数据之间的波长间隔通常在2-20 nm范围内。

假设两个测试波长中间的波长上的CD系数与上述波长间隔上的平均CD相等。然后像在其它方法中一样，将获得的CD数据拟合到为每种光纤规定的方程中。

总体而言，这种方法除了直接获得CD且花费较高外，与PSM法非常类似。

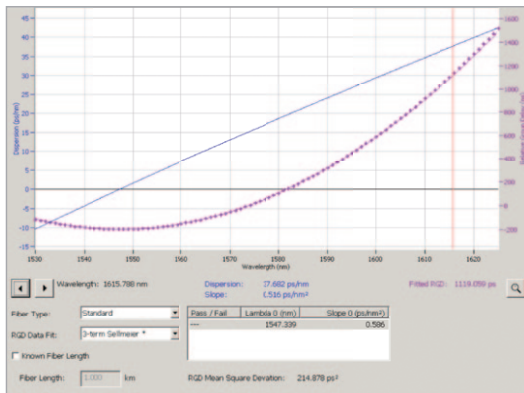


图33—使用改进PSM法，G.653光纤在C波段的RGD和CD系数现场测量结果

8.2.5 时域法中的光谱群延迟

时域法中的光谱群延迟在于直接测量不同波长脉冲通过长度已知的光纤的相对时延。该方法基于测量不同波长的“飞行时间”差，也被称为飞行时间法、脉冲延迟法或OTDR法。事实上，OTDR会在不同波长时，测量直至最后一个反射的不同距离。因为折射率不同，所以各个波长的传输距离也会不同。这种变化接下来会被转化为时域，并最终变成延迟与波长的对比。

这种方法可能会使用光源在多个波长时发出的光脉冲，这些波长大于或小于零CD时的典型波长。这些光脉冲必须持续时间短，具有足够的强度，并具备时空稳定性，以便获得优质的测量结果。显而易见，OTDR的使用极大地简化了脉冲持续时间选择。

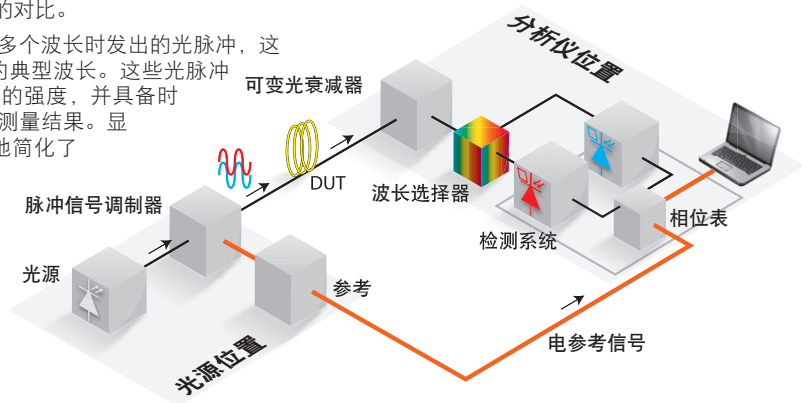
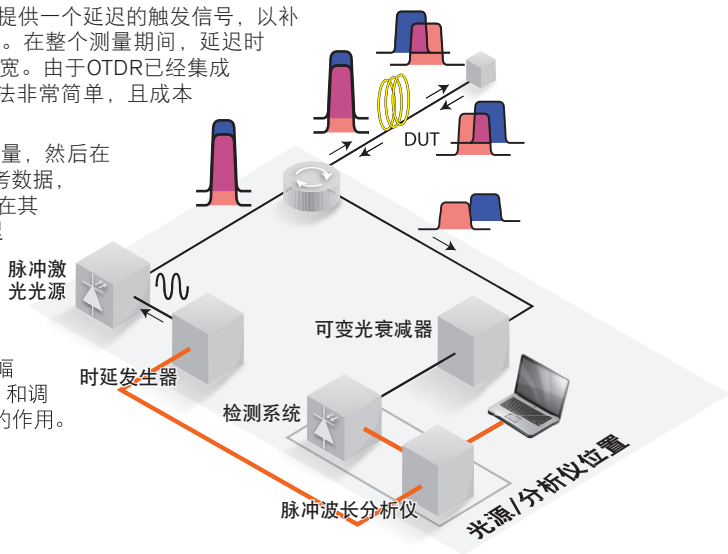


图34—DPSM测试设置示意图

由光源触发的延迟发生器会向取样器提供一个延迟的触发信号，以补偿测试和参考样本之间的传输延迟差。在整个测量期间，延迟时间必须稳定；抖动和漂移必须小于脉宽。由于OTDR已经集成了这些复杂的光学元件，因此OTDR法非常简单，且成本较低。

在一段较短的参考光纤上进行多次测量，然后在从被测光纤上获取的数据减去这些参考数据，从而获得相对的光谱群延迟。然后像在其它方法中一样，将获得的光谱群延迟拟合到为每种光纤规定的方程中。

线性检测系统使用高频取样器，能够以校准的时间比例来显示光脉冲的相对到达时间。可以使用光衰减器来维持不变的信号幅度。OTDR法中使用的检测电子设备，和调制器和触发电子设备也可以起到相同的作用。



OTDR设置示意图

图35—时域法中的光谱群延迟

图35显示了时域（飞行时间/OTDR）法中的光谱群延迟测试设置。

图36显示了OTDR法的工作原理。

可使用合适的Sellmeier系数的最佳拟合值，并按要求计算CD或其它参数来获得色散系数。

图37显示了采用OTDR法获得的长度为25 km ($\lambda_0 = 1553.405$ nm) 的典型G.653 SMF光纤的测试结果。

在OTDR法中，使用直至最后一个事件的距离差来计算CD。测量精度取决于测量最后一个反射的能力。

OTDR法的最大优点是可在单端进行测量。这通常会对运营成本有很大影响。

大多数OTDR仅使用整个光纤光谱窗口内的几个波长 (>300 nm)。推荐用于任何类型的光纤的拟合方程是5项Sellmeier方程，它要求至少解析5点。也可以使用较少的点，但需要一些假设。

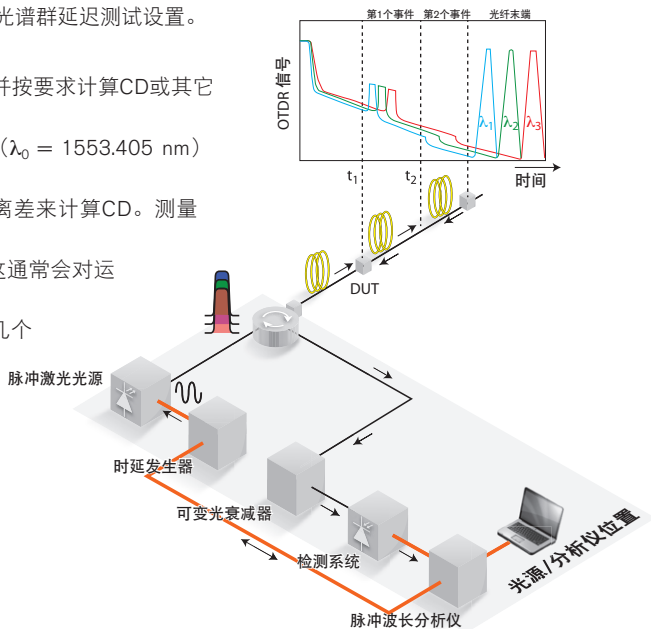


图36—OTDR法工作原理

根据光纤衰减，衰减越多的波长信号（在G.652光纤上1310 nm或接近水峰，如1410 nm）会在70至80 km后消失（动态范围至多为30-50 dB），造成在整个波长范围上只分析3个点（用于CD估算）。当某些波长消失时，其它读数被曲线末端的噪声盖过。由于测量的可重复性与OSNR相关，取决于光纤长度，获得可接受的可重复性而不是精度所需的平均时间会迅速增加。取样时间可能会增加到每个曲线10分钟（通常总共需要40分钟）。此时，限制的距离可能约为70 km。相反，距离越短，测量变得越困难。事实上，由于自身的时钟、同步和脉冲可重复性等原因，OTDR有现严重的不足之处；这最终可能会导致短光纤上的测量结果劣化。因此，估计最小距离可能为10 km左右。

不确定度取决于脉冲形状和宽带，以及不同激光的数量（波长数据点数量）。虽然这种方法能够提供更好的空间分辨率，短脉冲会扩散并变形，使得确切的到达时间很难判断。这种简单的技术在使用时也相对不够准确。因此需要改进，以便能够和PSM法提供相同水平的不确定度。例如，可以使用更多波长或可调式激光，但需要的投资会迅速使OTDR法所需的成本与PSM持平。然而，考虑到它是一种单端测试，OTDR法仍然可以节省运营支出。

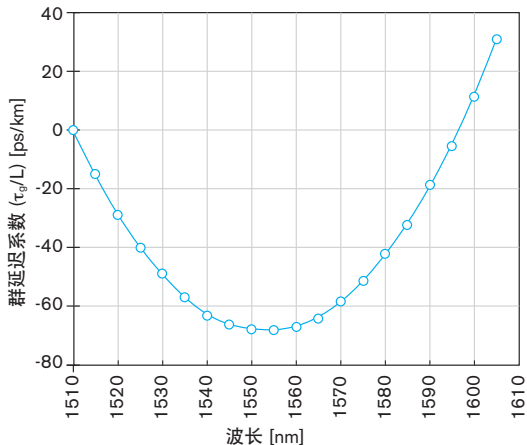


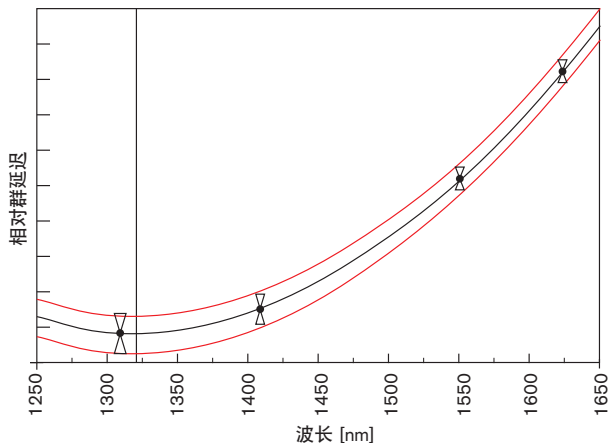
图37—OTDR法测得的相对群延迟

图38显示了OTDR法使用四个波长测试时出现的不确定度问题。

对于SMF光纤，PSM（DPSM）迄今为止被认为优于时域中的光谱群延迟（飞行时间/OTDR）法，因为它：

- 提供更准确的时间测量
- 在出现其它CD机制时，功能更加强大

使用一个可调式光源而不是多个离散光源可以测试更多的波长，并克服上述准确度不足的问题。



备注： $\lambda_0 = 1320.14 \text{ nm}$ （垂直线）， $D = 16.641 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$

图38—与OTDR法相关的不确定度问题

9.相干系统中的色度色散测试

为了满足持续增长的高带宽需求，并避免进行大规模投资来建设新系统，许多运营商正在寻求再利用现有的光纤基础设施。但这样做会带来一个问题，因为被称为开关键控（OOK）的一系列标准的“1”和“0”无法在已安装的光纤上继续传输。

为了解决这个问题，系统厂商开始采用单位符号比特更高的调制格式。其中，最受欢迎的格式称为双极化四相相移键控（DP-QPSK）。然而，适用于OOK的直接检测方法不适用于此类调制格式。因此，这些DP-QPSK经常被称为相干检测系统，从而提供了一种在光纤存在物理损伤（如色度色散和偏振模色散）的情况下仍然能够获得信息的方法。

虽然这些系统能够容忍更多的损伤，但它们并非丝毫不受损伤影响。例如，对外宣传的平均PMD容限规格一般为25 ps。这虽然在理论上成立，但对于实际的系统来说，这意义不大，因为系统可能在色散为10 ps时便已出现问题；此类系统与10 Gbit/s系统的极限容限一样。问题是在NRZ中，PMD值暂时较高只会造成少量的误码，而且在很多情况下可以通过FEC予以补偿。在相干系统中，较高的PMD会导致整个DSP出现故障，造成服务完全中断持续几秒钟或需要重启系统。

尽管相干系统并不完美，但它更加健壮、可靠，是唯一一种能够经济高效地提供高带宽的方法，适用于正寻求将系统升级至100G以太网的服务提供商。

由于相干系统相对更加健壮、可靠，并能容忍更高的物理损伤，因此可部署在更长的线路上，通常为骨干网或核心网光纤段。然而，这意味着需要更多地放大信号。为了尽可能减少在基础设施中将某些系统升级至新系统，并确保该方案在经济上切实可行，必须考虑一些不足之处。DP-QPSK和相干检测的主要缺陷是光信噪比（OSNR）。这些系统的升级需要更高的OSNR。由于这些光纤段较长，信号需要放大或泵浦以传输更长距离，所以必须对现有信号进行低噪放大，以增强信号强度。所以拉曼放大在大多数相干系统中非常普遍，因为无论在新系统或现有系统中，拉曼放大的目的是在EDFA输入端提高光功率，以便改善OSNR。

9.1 拉曼增益

虽然EDFA将掺铒光纤作为放大介质，拉曼增益分布于整个传输光纤上。拉曼放大可能会同向传播（即连接到Tx端口并直接在Tx端口增强信号），也可能会反向传播（即连接到Rx端口，泵浦能量向上汇聚到信息流中），从而在信号减弱时放大信号。OSNR的改善幅度高达11 dB，这对相关系统部署非常关键。

由于拉曼将传输光纤作为放大介质，因此光纤质量是一个主要考虑因素。增益性能主要取决于光纤设备性能，包括损耗。在工程阶段，应考虑熔接损耗、菲涅耳反射和光纤衰减。如果熔接损耗较高，配线架质量较差，会减少传入光纤的拉曼功率，从而影响能够获得的增益。配线架区域内的宏弯也成为需要关注的问题。因为拉曼泵浦的功率较高，连接器脏污或连接质量不高也成为问题。此时，需要清洁连接器。

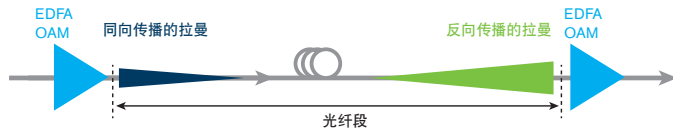


图39—拉曼放大可能会同向传播，也可能会反向传播

增益也与光纤的有效面积有关。由于拉曼将传输光纤作为放大介质，纤芯面积也是影响所造成增益大小的因素。纤芯较小会造成功率密度和增益较高，而纤芯较大造成功率密度和增益较低。因此我们可以得出结论，成功的拉曼设计应考虑光纤的有效面积，可以根据光纤类型（SMF-28（G.652）、LEAF、True Wave）来判断光纤的有效面积。在不同类型的光纤中，相同的泵浦功率会造成不同的增益。

在设计和安装拉曼泵浦时，了解光纤类型（即有效面积）是常见步骤。这使得我们能够相应地调整泵浦（见图40）。

9.2 了解有效面积

如上所示，正确调整拉曼增益（即获得正确增益）的关键主要取决于光纤类型。必须在设计时了解光纤类型（拉曼增益）。在新建系统中，这通常不会成为问题，因为工程师一般都了解安装了何种光纤。然而，在现有系统中，已有的光纤经过许多技术人员的处理，因为并购光纤数量增加，光纤的重新布置没有正确记录，或光纤历史记录消失不见。在工程阶段，设置工具需要泵浦之间每段光纤的类型作为输入值。在不知道光纤类型时，设计通常将光纤类型假定为ITU G.652标准单模光纤（SMF-28）。如果不了解光纤的有效面积会有什么后果？可能会错误地设计拉曼增益。

如前文所述，在不同类型的光纤中，相同的泵浦功率会造成不同的增益。拉曼的应用包括长距离、多光纤段系统。设置要求从Tx信号生成的节点相继配置每个光纤段，然后配置各个泵浦之间的光纤段。这会包括dB损耗、光纤长度和光

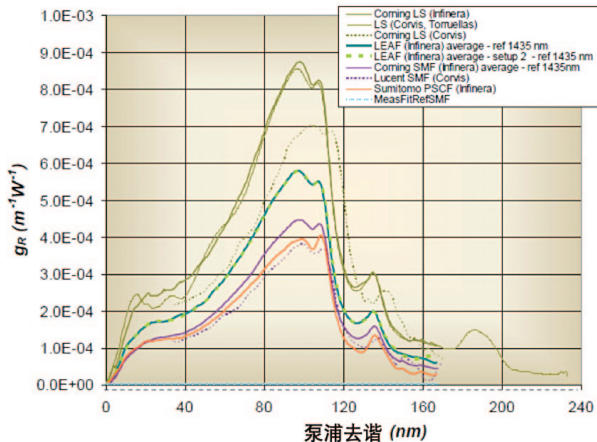


图40—各种光纤的拉曼增益

来源：Cisco

纤类型。如果光纤段是双向的，将拉曼泵浦改为单向，直至信号到达末端，然后将拉曼泵浦改为另一个方向。如果因为记录不准或没有记录，或因为假定的泵浦之间的光纤类型有误，造成某类型光纤的设计不正确，开通会停止；这意味着需要更多的工程时间。大多数系统开通要求在较短的维护窗口期间，在泵浦处部署很多技术人员。重返现场可能会非常耗时，且成本很高。在某些情况下，可以在网络中使用多种类型的光纤将发射器和接收器连接起来。这也需要加以考虑，因为设计工具目前不允许混合的光纤输入，但要求识别第一个50 km内的主要光纤类型。

9.3 CD测试

如本文开头所述，相干系统中的色度色散容限很高，因此不一定需要进行色散补偿。然而，进行色度色散测试可以帮助更好地了解情况，尤其是单端测试，它还可以测量光纤长度。

色度色散分析仪测量光纤在不同波长下的色度色散，包括色度色散斜率。通过这些参数，CD测试设备可计算出入零值——没有出现色散时的波长。

此外，每一种光纤都有自己的特征，包括CD系数、CD斜率和 λ 零值。

CD系数为单位长度光纤的色度色散，单位为km。这意味着知道了光纤的准确长度。当CD设备为单端设备时，可使用反射仪来测量长度，从而获得CD系数。

表12—光纤特征示例

光纤类型	缩写	λ_0	1550 ps/ (nm*km) 时的色散	1550 nM(ps/ (nm*nm)*km)时的斜率
标准单模	SM	1300-1324 nM	16-18 (典型值17)	~.056
Corning LS	LS	~1570	-3.5至-0.1 (典型值-1.4)	~.07
色散位移	DS	~1550	~0	~.07
True Wave Classic	TW-C	~1500	0.8-4.6 (典型值2)	~.06
True Wave Plus	True Wave Plus	~1530	1.3-5.8	
True Wave Reduced Slope	TW-RS	~1460	2.6-6 (典型值4)	<.05 (典型值.045)
Corning E-LEAF	E-LEAD	~1500	2-6 (典型值4)	~.08
Alcatel Teralight	Teralight	~1440	5.5-9.5 (典型值8)	~.058
True-Wave Reach	TW-Reach	~1405	5.5-8.9 (典型值7-8)	<0.45

一旦运营商测试某段光纤的色度色散后，可能不再需要将总色散用于相干信号。然而，总色散有可能和单端色散分析仪确定的光纤长度结合使用来计算1550 nm时的色散系数。它也可和色散斜率及 λ 零值结合使用来确定光纤类型。例如，部署包括反向传输拉曼泵浦的100 GigE相干检测信号的大型服务提供商必须测试40 km长光纤段的损耗、ORL和色度色散。CD测量可获得1500.27 nm时的CD系数为4.48 ps/nm/km以及 λ 零值。根据上表，我们可以判断这段40 km长的光纤很可能是Corning E-LEAF光纤，设计工具中的数据建议开通拉曼泵浦。如果不知道光纤类型，泵浦的设计工具会假设其为标准单模光纤，增益可能会比预计值高，从而很可能导致四波混频(FWM)或其它非线性效应。

目前有相当一部分的DWDM网络包括拉曼泵浦。拉曼泵浦需要在系统设计和优化阶段知道光纤类型以便能够决定正确的增益。一种有效方法是逐个测量每段光纤的色度色散参数。单端测试仪的优点有两个：它们可以自动测量光纤长度和CD系数。这就不需要使用OTDR来测试，或依赖有可能错误的的数据。此外，由于必须在较长距离的距离内鉴定多段光纤，使用端到端测试设备来鉴定需要付出更多努力：不仅需要两个技术人员，还需要这两个技术人员来回奔波并同时开始测试。

完整鉴定光纤特征，包括其色度色散，仍然是在设计使用现有光纤的系统时需要完成的重要一步。在设计基于相干检测的系统时完整鉴定光纤特征也同样重要，但完全是由于新原因。从测试中收集到的数据可以帮助减少多天的工作量，提高获利时效并显著降低运营支出。

致谢

如果没有EXFO全体员工的积极工作和共同努力，尤其是产品线管理团队的辛苦工作和技术专长，就不会有本指南。


未经EXFO事先书面许可，不得以任何形式或方式
复制本指南的任何部分。

加拿大印刷和装订

ISBN 978-1-55342-100-9

法定送存—加拿大国家图书馆2012

法定送存—魁北克国家图书馆2012

A nighttime photograph of a city street. In the foreground, there are blurred light trails from cars, creating streaks of white, yellow, and green. To the left, a building with large, classical-style columns is illuminated. In the background, several tall skyscrapers are lit up, with one prominent one having a red and yellow banner. The overall scene is vibrant and dynamic.

如欲获得有关我们任何产品和服务的详细信息，或者下载技术和应用说明，请访问我们的网站：www.EXFO.com。

EXFO