

10 Gb/s 以太网用多模光纤的带宽评估

0 引言

众所周知,多模光纤是光纤通信技术发展初期用于信号传输的主要光纤类型。相对于单模光纤,多模光纤由于其本身的性能特点,目前主要应用于局域网、大楼内布线等短距离或甚短距离(short reach or vary short reach)数据传输。一般的多模光纤可满足 10 Mb/s、100 Mb/s 传输速率的应用,但在更高速率的传输应用中就达不到预期效果。千兆乃至万兆以太网的发展,使得具有特定性能的新一代多模光纤在相应的工艺技术支持下应运而生,相对于一般的多模光纤,它在传输带宽方面具有很大提升,从而能更好地适合于千兆乃至万兆以太网短距离高速率信号传输。

1 原带宽评估方法的不足^[1-2]

近年来,垂直腔面发射激光器(VCSEL)由于其制造简单、成品率高、成本低以及调制速率高而非常适合 10 Gb/s 以太网宽带应用,以 VCSEL 作为传输系统光信号发射机的光源是 10 Gb/s 以太网用多模光纤的优选配置。

以往一般多模光纤传输系统使用的光信号发射机光源大多采用发光二极管(LED)。其中特别是面发射 LED(SLED)因自身结构使其光束发散角较大,即便后来研发的边发射 LED(ELED),尽管其调制速率有较大提高,光束发散角也有改善,但光束的发散角仍较大。一般的半导体激光二极管(LD)的光束发散角优于 SLED,与 ELED 相当(因为基本结构相同),其典型的垂直发散角为 30°,折算成数值孔径(NA)为 0.26,大于 50 μm/125 μm 多模光纤的 NA(约为 0.20)。因此,原先多模光纤带宽标准测量方法的注入条件(launch condition)是“满注入(filled launch)”,即:注入光锥角大于被测光纤最大 NA 理论值;注入光斑直径与被测光纤芯径相当。这个注入条件符合以往一般多模光纤实际应用光源发射(或注入光纤)状态,并且同时符合标准规定的“光纤波导所有导模被均匀激励”,因而能使测量结果客观准确反映被测多模光纤设计的带宽性能。

而 VCSEL 与传统边发射 LD 结构不同,光是从垂直于半导体衬底表面的方向出射的,因此除了具有圆对称远近场光分布(非常适合与光纤在几何形状上的耦合匹配)和高动态调制速率(适合高传输速率应用)外,还具有更小的光束发散角。如果再采用此前标准规定的“满注入”条件进行与之相配的 10 Gb/s 以太网用多模光纤带宽测量评估,将不能确切地反映多模光纤实际工作时的带宽情况,从而影响整个传输系统准确的设计预算。因此,有必要重新考虑高速率以太网应用多模光纤的带宽评估方法。

2 带宽评估的规范要求和方法

2.1 规范要求和评估方法一

如上所述,高速率以太网用新一代多模光纤因采用 VCSEL 光源而具有比设计更高的实际带宽。其具体的带宽评估将取决于所采用的 VCSEL 发射的模式功率分布(Mode Power Distribution, MPD),或被评估光纤的注入状态。有关国际标准分别对系统光发射机采用的激光器光束性能和使用的光纤微分模延迟(DMD)提出了要求^[1]。除了激光器中心波长 $\lambda_c = (850 \pm 10) \text{ nm}$ (目前仅有该波长正式规范,事实上 1 300 nm VCSEL 技术上已有突破并有产品;1 550 nm VCSEL 尚受制于激光腔体高反射镜技术)外,光束的 MPD 应符合下列规定:**a.**半径 4.5 μm 环光通量(Encircled Flux, EF) ≤ 30%;**b.**半径 19 μm 环光通量 ≥ 86%。EF 的定义如下:

$$EF(r) = \int_0^r I(r) r dr / \int_0^{r_{\max}} I(r) r dr \quad (1)$$

式中 $I(r)$ 为径向变量 r 函数的近场光强分布; $r_{\max}$ 一般为纤芯半径的 1.15 倍。与此要求相关的标准测量方法^[3]是通过精密定标的 CCD 摄像扫描技术测得近场光强分布 $I(r)$,再按上述定义进行计算。

多模光纤 DMD 应符合表 1 的规定。多模光纤 DMD 标准测量方法^[4]是采用窄脉冲光信号通过单模光

纤探针 (probe) 对被测光纤进行径向扫描检测的技术。为了与被测光纤精密的折射率分布相适应而保证足够高的扫描空间分辨率, 作为扫描探针的单模光纤, 在 850 nm 波长下的模场直径 (MFD) 相对于该方法原先的规定更小, 仅为 5 μm 。

表 1 多模光纤的 DMD 要求

扫描组合	ps/m	
	扫描半径范围为 5 μm ~18 μm 时	扫描半径范围为 0 μm ~23 μm 时
1	≤ 0.23	≤ 0.70
2	≤ 0.24	≤ 0.60
3	≤ 0.25	≤ 0.50
4	≤ 0.26	≤ 0.40
5	≤ 0.27	≤ 0.35
6	≤ 0.33	≤ 0.33

事实上, 上述光源和多模光纤的要求之间可以达到一种平衡或折衷。换言之, 采用符合上述要求的光源时, 多模光纤达到表 1 规定的扫描组合之一的 DMD 要求, 即可满足 10 Gb/s 以太网应用要求。通过对多个不同制造商提供的多模光纤和光源进行研究模拟, 上述规范至少可保证 2 GHz km 的有效模式带宽 (EMB) 距离积。由此, 有关标准规定多模光纤 EMB 距离积 $\geq 2 \text{ GHz km}^{[1]}$ 。

2.2 规范要求和评估方法二

另一种评估方法是根据被测光纤的 DMD 和所采用光源的 MPD 计算 EMB。最小有效模式带宽 $\text{EMB}_{\text{c}, \text{min}}$ 应满足: $1.13\text{EMB}_{\text{c}, \text{min}} \geq 2 \text{ GHz km}$ 。这种通过计算 EMB 进行带宽评估的方法类似一般多模光纤带宽测量^[2]中对脉冲展宽方法 (时域法) 所得结果的处理, 这时光纤传递 (transfer) 函数或基带响应可表示为:

$$H_{\text{fb}}(f) = F[P_0(t)]/F[P_i(t)] \quad (2)$$

式中 $P_0(t)$ 为经被测光纤传输后的输出光脉冲; $P_i(t)$ 为输入光脉冲; F 为 Fourier 变换运算。这里计算 EMB 所涉及的测量是 DMD 而不是展宽的脉冲, 并且式中的 $P_0(t)$ 不仅与 DMD 有关, 同时还取决于光源发射的 MPD, 是 DMD 脉冲的幅度 (功率) 加权和 (weighted sum), 即:

$$P_0(t) = \sum_r W(r)P_d(r, t) \quad (3)$$

式中 $P_d(r, t)$ 为距光纤中心 r 处的光脉冲的光功率; $W(r)$ 为对应所采用光源辐射 MPD 的加权函数 (weighting function)。

基于 DMD 测量的光纤模式带宽数学描述具有更加直观的形式:

$$H(f) = \sum_g P_g \exp(i2\pi f \Delta \tau_g) \quad (4)$$

式中 $\Delta \tau_g = \tau_g - \tau_{\text{avg}}$, τ_g 为群时延, τ_{avg} 为群时延的矩心 (centroid), $\tau_{\text{avg}} = \sum_g P_g \tau_g$ 。

不考虑相频特性时, $H(f)$ 幅值为:

$$|H(f)| = \left\{ \left[\sum_g P_g \cos(2\pi f \Delta \tau_g) \right]^2 + \left[\sum_g P_g \sin(2\pi f \Delta \tau_g) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

上式表示的频率函数的一 3dB 幅值对应的频率宽度即定义为光纤带宽。式中 P_g 为经加权的模群 (位于光纤特定 r 处) 功率。加权函数 $W(r)$ 可由所采用光源近场光通量导出^[1]。运用对应典型光源的一组加权函数, 可计算相应若干有效模式带宽 EMB_{c} , 其中最小值 $\text{EMB}_{\text{c}, \text{min}}$ 作为特定光纤带宽性能评估。

3 结 语

区别于一般多模光纤, 10 Gb/s 高速率以太网应用多模光纤因其具体使用条件及本身设计性能的特殊性, 其带宽的评估应充分考虑光源的辐射特性 (如 MPD), 从而使结果更加符合实际应用情况。顺便指出, 如果采用传统的标准“满注入”方法进行测试, 这类光纤带宽要求可定为 $1.5 \text{ GHz km}^{[1]}$, 这是由于在这种注入条件下, 光纤中能够出现的全部模式均被充分激励, 带宽较之前述状态当然要降低些, 这在有关标准中

仅作为参考的内容。

[参 考 文 献]

- [1]IEC. IEC 60793-2-10—2002 Optical fibres-Part2-10:Product specifications-sectional specification for category A1 multimode fibres. IEC: [s.n], 2002.
- [2] IEC. IEC60793-1-41—2003 Optical fibres-Part1-41 Measurement methods and test procedures-Bandwidth. IEC: [s.n], 2003.
- [3]IEC. IEC61280-1-4 — 1998 Fibre optic communication subsystem test procedures-Part 1-4: General communication subsystem-Collection and reduction of two-dimensional nearfield data for multimode fibre laser transmitters. IEC: [s.n], 1998.
- [4]IEC. IEC60793-1-49—2003 Optical fibres-Part1-49:Measurement methods and test procedures-Differential mode delay. IEC: [s.n], 2003.