

第 1 章 绪 论

内容提要：本章介绍光纤通信的基本概念和特点、光纤通信系统的基本组成，讨论衰减、色散等光纤通信的基本技术问题和主要性能指标，并对该领域做回顾与展望，使读者对光纤通信的基本知识有较系统的了解。

知识要点：光纤通信系统中光的特性；光纤通信系统的基本组成；衰减、色散、非线性效应；比特率和带宽、传输距离、通信容量。

教学建议：学时 6，必修。

1.1 光纤通信的概念

1.1.1 什么是光纤通信

通信是各种形式信息的有效传递，为了实现这一目的，需要相应的技术设备和传输介质。我们以调幅广播为例，话音信号经过话筒后转换为电信号，然后借助于频率范围为 526.5~1605.5kHz 的载波，将信号“装载”到载波上并通过发射天线发送出去，在接收端由接收天线再将其“卸载”下来，这个过程称为信号的调制和解调。调幅广播的传输介质是大气信道。

光纤通信是用光作为信息的载体，以光纤作为传输介质的一种通信方式。它首先要在发射端将需传送的电话、电报、图像和数据等信号进行光电转换，即将电信号变成光信号，再经光纤传输到接收端，接收端将接收到的光信号转换成电信号，最后还原成原信号。图 1.1.1 为光纤通信系统的构成示意图。

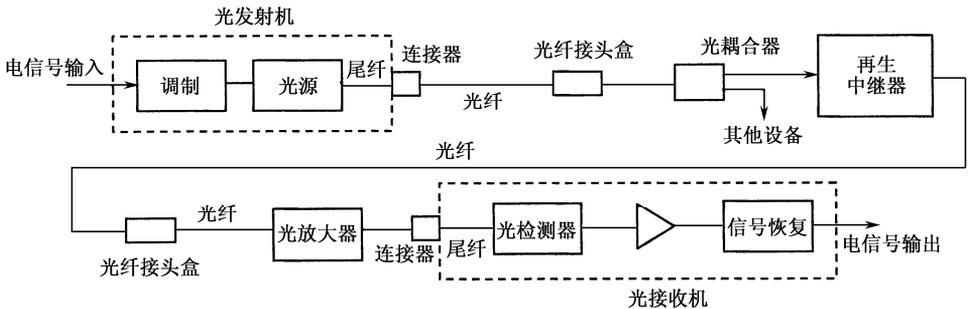


图 1.1.1 光纤通信系统的构成示意图

光纤通信系统可分为三个基本单元：光发射机、光纤和光接收机。光发射机由将带有信息的电信号转换成光信号的转换装置和将光信号送入光纤的传输装置组成。光源是其核心部件，由半导体发光二极管 LED (Light Emission Diode) 或者激光二极管 LD (Laser Diode) 构成；光纤在实用系统中一般以光缆的形式存在；光接收机由光检测器、放大电路和信号恢复电路组成。光发射机和光接收机也称为光端机。在光纤通信系统中还包括大量的有源、无源光器件，连接器起着各种设备与光纤之间的连接作用，光耦合器用于需要将传输的光分路或合路的场合，光放大器起着对光波放大的作用，用于弥补光信号传输一定距离后，因光纤衰减产生的光功率减弱。

1.1.2 光纤通信中光的作用及特性

在光纤通信系统中，光是信息的载体，光必须经过光纤传播，而在光发射机和光接收机中，核心部件承担着电/光、光/电转换的作用，由此可见光在光纤通信中的重要地位。光的性质有很多，下面将围绕光在光纤通信中的作用进行讨论。

1. 光作为载波，可以极大地提高信道的带宽

带宽是信号进行传输且没有明显衰减的频率范围，信道的带宽越大，信道容量就越大。我们以模拟信号为例，说明信号携带的信息量与其所占的带宽有关。比如，话音信号的带宽约为 4kHz，电视图像信号的带宽为 6MHz，显然电视图像的信息量比话音信号的信息量大。所以信号占据的频带宽，意味着携带的信息量大，那么传输该信号的信道带宽也要随之增大。信道容量与信道带宽之间的关系可由香农·哈特利（Shannon-Hartley）定理表示：

$$C = B \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (1.1.1)$$

式中， C 为信道容量（单位为 b/s）； B 为信道带宽（单位为 Hz），SNR 是信号功率与噪声功率的比值，称之为信噪比。由式（1.1.1）可见，增加信道带宽可以有效地提高信道容量。

信道的带宽又取决于载波的频率，载波频率越高，信道的带宽就越大，系统的信息传输能力也就越强。按经验，带宽大约为载波信号频率的十分之一。从图 1.1.2 的通信系统电磁波频谱可见，双绞线的工作频率可以到 300kHz，同轴电缆为 1GHz，微波波导传输信号的频率可高达 100GHz，而光纤通信所用光的频率范围为 100~1000THz，其带宽可达 50THz。目前单波长信号速率已达到 40Gb/s。

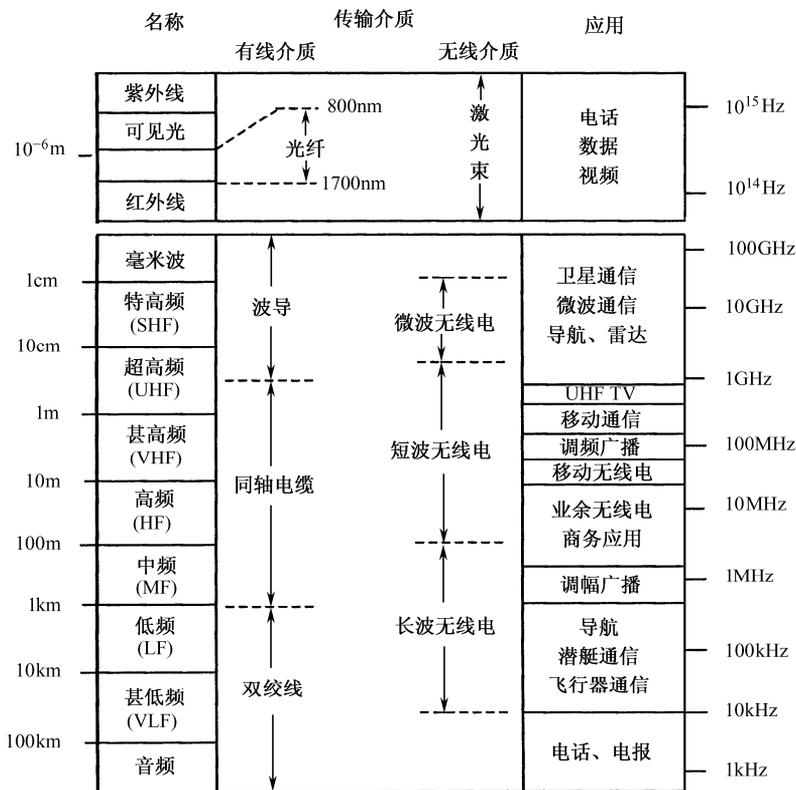


图 1.1.2 通信系统电磁波谱

2. 光在光纤中传输的工作波长由光纤特性决定

可见光的波长范围为 400~700nm, 从理论上来说, 光还包括紫外线和红外线, 其波长范围大约为 $3\sim 3\times 10^6\text{nm}$, 光纤通信光源使用的波长范围在近红外区内, 波长在 800~1700nm 之间, 属于不可见光, 但这个范围的光不是都可以在光纤中传输的。事实上光纤对不同波长的光呈现的传输特性有很大差别, 这里主要考虑光纤的衰减特性, 也称为损耗特性, 因为低损耗是实现光信号长距离无中继传输的前提。

光纤的损耗包含两个方面: 一是因光纤材料(石英)和结构引起的吸收、散射等造成的损耗, 二是组成系统时所产生的损耗, 例如接插件连接损耗、弯曲损耗等, 在此仅说明光纤本身的损耗。图 1.1.3 是一个典型的石英光纤损耗谱, 由图可见, 大约在 850nm、1310nm 和 1550nm 处有三个低损耗窗口, 也称为透光窗口。第一代光纤通信系统工作在 850nm 附近, 早期制造的光纤在这个区域有局部的最小损耗。现在通过降低光纤材料中氢氧根离子和金属离子的含量, 已经可以制造在 1100~1600nm 范围内损耗极低的光纤, 目前常用的工作波长在 1310nm 和 1550nm 处。三个窗口的衰减分别为: 850nm 附近为 2dB/km, 1310nm 附近为 0.5dB/km, 1550nm 附近为 0.2dB/km。我们把 1530~1565nm 的波长范围称为 C 波段, 这是目前高速大容量长距离系统常用的波段。

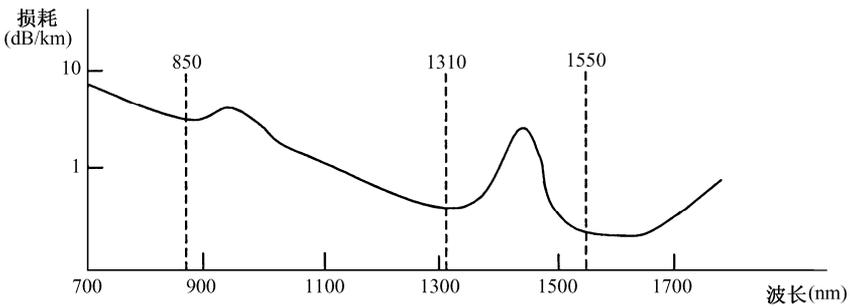


图 1.1.3 典型的石英光纤损耗谱

3. 光在光发射机和光接收机中的工作是基于光的辐射与吸收

光发射机和光接收机中的光源和光检测器是基于半导体材料对光的辐射与吸收机理工作的。半导体材料的导电特性介于金属和绝缘体之间, 其导电特性可以借助于图 1.1.4 所示的能带图来解释, 纵轴表示能量, 横轴长度没有意义。

如果导带 E_C 上的电子跃迁到价带 E_V 上, 其间的能量差(也称能带差) $E_g = E_C - E_V$ 将以光的形式放出, 这个释放的能量被称作光子, 光子的频率记作 ν , 它与能带差的关系为

$$E_g = h\nu \quad (1.1.2a)$$

或者
$$\lambda = hc/E_g \quad (1.1.2b)$$

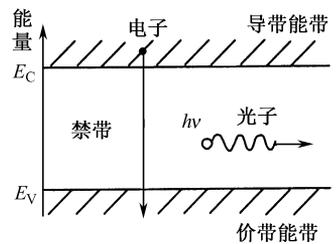


图 1.1.4 能带图

式中, h 为普朗克常数 ($h = 6.626\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$); c 为光速; E_g 的单位是焦耳 (J), 但常用电子伏特 (eV) 表示, 两者的换算关系为 $1\text{eV}=1.6\times 10^{-19}\text{J}$ 。 λ 的单位为米 (m), 但常用微米 (μm) 表示。我们可以通过控制半导体材料的成分来改变能带差, 从而改变其发光波长。半导体发光二极管 LED 的工作正是基于电子从高能带跃迁到低能带将电能转变为光能的机理。把电流

注入半导体中的 PN 结上，则原子中占据低能带的电子被激励到高能带后，再跃迁到低能带上，它们将自发辐射出光子，如图 1.1.5 (a) 所示。

高能带中的电子实际上处于不同的能级，不可能都恰好带有相同的能量。当它们自发辐射到低能带的不同能级上时，根据式 (1.1.2a) 可知，这些光波的频率并不完全一样。另外这些光波还具有不同的相位和偏振方向，因此自发辐射光是一种非相干光，即不是单一频率、相位和偏振方向相同的光。

光探测器的工作过程则与 LED 相反，如果把能量大于 E_g 的光照射到半导体材料上，则处于低能带的电子吸收该能量后被激励而跃迁到高能带上。我们可以通过在半导体 PN 结上外加电场，将处于高能带的电子取出，从而使光能转变为电能，如图 1.1.5 (b) 所示。

激光二极管 LD 的工作机理为受激发射，即在入射光的激发下，产生与入射光频率、相位、偏振方向及传播方向一样的发射光。当然，后者的强度远远大于前者，如图 1.1.5 (c) 所示。要实现受激发射需要两个条件：一是高能带上的电子密度要大于低能带上的电子密度，这种状态称为粒子数反转，可采用通过向半导体激光二极管注入正向电流的方式来实现粒子数反转；二是半导体激光器中必须存在光子谐振腔，并在谐振腔里建立起确定的振荡，从而得到单色性和方向性好的激光输出。

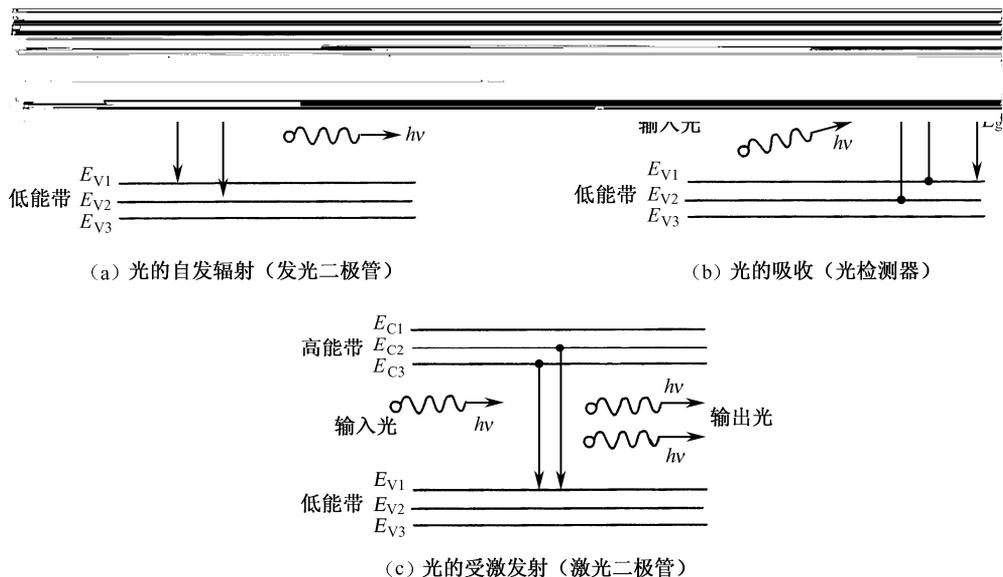


图 1.1.5 半导体中光的自发辐射、受激发射和吸收

1.1.3 光纤通信的优势

光纤通信与其他形式通信的主要区别有两点，一是载波频率很高，二是用光纤作为传输介质，其优势体现在以下几个方面。

1. 信道带宽极宽，传输容量大

随着社会信息化进程的发展，人们对通信的依赖程度越来越高，对通信系统运载信息能力的要求也日趋增强。有线通信从明线发展到电缆，无线通信从短波发展到微波和毫米波，都是试图通过提高载波频率来提高信道容量。而光纤中传输的光波是迄今为止使用频率最高的载波，其传输容量无疑也是最高的。

限于器件等技术因素的制约，目前光纤通信应有的通信能力并没有完全发挥出来。例如，理论上—根光纤可以同时传输近 100 亿路电话和 1000 万路电视节目，而实用水平为每对光纤传输 48 万多路电话信号。

在实际使用中，常使用组合光纤数不等的光缆，加之一些新技术的应用，如密集波分复用技术，其传输容量可以满足任何条件下信息传输的需要。

2. 中继距离长

所谓中继距离是指传输线路上不加放大器时信号所能传输的最大距离。当信号在传输线上传输时，由于传输线的损耗会使信号不断衰减，信号传输的距离越长，其衰减程度就越大。当信号衰减到一定程度后，对方就收不到信号了。为了延长通信的距离往往要在传输线路上设置一些放大器，也称为中继器，将衰减了的信号放大后再继续传输。显然，中继器越多，传输线的成本就越高，通信的可靠性也会降低。若某一中继器出现故障，就会影响全线的通信。

在通信系统设计中，传输线路的损耗是主要考虑的基本因素，表 1.1 列出了电缆和光纤每千米传输损耗。可见，光纤的传输损耗较之电缆要小很多，所以能实现很长传输的中继距离。在 1550nm 波长区，光纤的衰减系统可低至 0.2dB/km。它对降低通信成本，提高通信的可靠性及稳定性具有特别重大的意义。目前，光纤组成的光纤通信系统最大传输中继距离可达 200 多千米，而同轴电缆系统的最大传输中继距离仅为 6km。

表 1.1 光纤和电缆的损耗比较

线路类型	损耗/dB/km
对称电缆	2.06 (4kHz 时)
细同轴电缆 ($\phi 1.2/4.4$)	5.24 (1MHz 时) 28.70 (30MHz 时)
粗同轴电缆 ($\phi 2.24/9.4$)	2.42 (1MHz 时) 18.77 (60MHz 时)
850nm 波长多模光纤	≤ 3
1310nm 波长多模光纤	< 1
1310nm 波长单模光纤	0.36
1550nm 波长单模光纤	0.2

3. 抗干扰

干扰是影响通信质量的重要原因。通信系统的干扰源很多，有天然干扰源，如雷电、电离层的变化和太阳黑子活动等；有工业干扰源，如电动机和高压电力线，还有无线通信的相互干扰等。干扰对通信系统的影响是通过干扰信号频谱落在通信系统工作频谱范围内产生的。为了降低干扰的影响，人们采取了数字通信、差错控制编码等措施，但并不能完全消除干扰对通信指标的劣化。而光纤中传输的光信号特定的频率范围，使它不易受各种电磁干扰的影响。同时光纤是由高纯度的二氧化硅材料制成的，不导电，也无电感效应，所以光纤通信系统可以从根本上解决多年来困扰人们的干扰问题。

4. 保密性好

保密性好是对通信系统又一重要要求。保密要求已从国家政治、军事、经济情报等领域扩展到企业经济、技术乃至个人通信领域。对信息的窃取通常有三个途径：一是直接接入式窃听；二是窃听计算机和终端设备辐射的电磁场；三是窃听电缆源辐射的电磁场。对于第一种窃听可以采取保密口令，信息加密等技术。对于第二种窃听可以采取加强电磁屏蔽措施，但电缆系统的完全屏蔽通常是比较困难的。现代侦听技术已能做到在离同轴电缆几千米的地方窃听电缆中传输的信号。但光波在光纤中传输，不易泄漏出来，难以用传统的方法窃听其中的信息，同时，它也不会干扰其他通信设备的正常工作。

5. 节约有色金属

光纤的主要原材料是来源丰富的二氧化硅。据测量，从上海至北京敷设一条电缆线路需

要用铜 800 吨，铅 300 吨。如果用光纤代替铜、铅等有色金属。在保持同样的传输容量下，仅需要 10 公斤石英。因此，光纤通信技术的推广将节约大量的金属材料，具有合理使用地球资源的意义。

除上述列举的优势外，光纤还具有线径细、重量轻、寿命长等优点。光缆的直径很小，144 芯光缆横截面直径不到 18mm，而标准同轴电缆为 47mm，利用光纤这个特点可以解决地下管道拥挤问题。由于光纤的重量轻，它被应用于飞机制造，不但降低了通信设备的成本和飞机制造的成本，而且提高了通信系统的抗干扰能力和飞机设计的灵活性。

由于光纤通信的诸多优点，除了在公用通信和专用通信中使用外，它还在其他许多领域，如测量、传感、自动控制及医疗卫生等方面得到了广泛的应用。

光纤本身也存在一些缺陷。光纤在生产过程中其表面存在微裂纹，从而使光纤的抗拉强度低；光纤的连接必须使用专门的工具和仪表，光分路、耦合不是十分方便，光纤弯曲半径不能太小等，但这些缺陷的影响在实际工程和维护工作中都可以避免或解决。

1.2 光纤通信系统的基本单元

在上节中，我们已经对光纤通信系统的构成进行了初步介绍。光纤通信系统是由光发射机、光纤和光接收机三个基本单元构成的，本节将进一步讨论这三部分的功能。

1.2.1 光发射机

1. 光源及其调制方式

如前所述，光发射机由将带有信息的电信号转换成光信号的转换装置和将光信号送入光纤的传输装置组成，而光源是光发射机的核心部件。目前光纤通信系统中常用的光源有发光二极管 LED 和激光器 LD 两种。这两种器件都是用半导体材料制成的，其主要参数和性能的比较如表 1.2 所示。

表 1.2 LED 与 LD 的比较

项 目	LED	LD
调制速率	几十兆赫兹	几吉赫兹
输出光功率	几毫瓦	几十毫瓦
光谱宽度	宽	窄
驱动电路	简单	复杂
温度影响	小	大
寿命	1×10^6 小时	1×10^5 小时
应用	低速、短距离	高速、长距离

光纤通信系统对光源的要求有以下几个方面：

① 光源发射的峰值波长必须位于光纤低损耗窗口之内，即为 850nm，1310nm 和 1550nm。

② 输出的光功率要足够高并且稳定。

③ 电光转换效率高，驱动功率低，寿命长，可靠性高。

④ 单色性和方向性好，以减小光纤材料色散效应，提高光源和光纤的耦合效率。

⑤ 调制特性好，响应速度快，以利于高速率、大容量数字信号的传输。

⑥ 输出特性（功率与电流的特性曲线）的线性度较高，可减小模拟调制时的非线性失真。

图 1.2.1 示出了 LED 和 LD 的外形图和输出特性。对于 LD 而言，当驱动电流由零开始增加时，输出功率增加并不多。只有当驱动电流大于阈值 I_{th} 后，输出光功率才明显增加。随着驱动电流的增加，输出光功率的增加很快。对于 LED 而言，其输出特性基本呈线性。

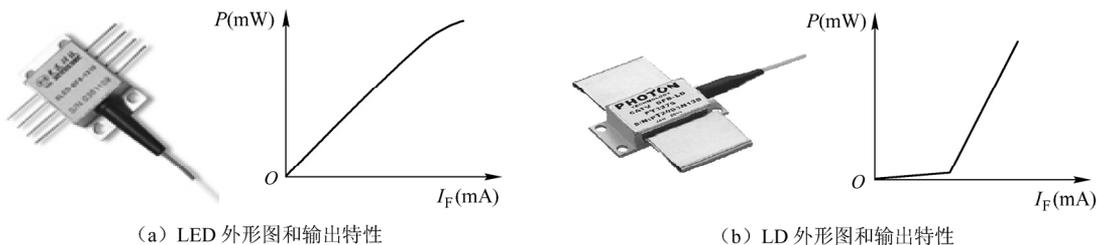


图 1.2.1 光源的外形和特性

输入到光发射机的电信号要转换成适合驱动光源的电流信号后，才能加到光源上。电流信号可以是模拟信号（如有线电视系统中使用的视频信号），也可以是数字信号（如计算机数据）。由于光源输出的光功率与驱动电流的关系可知，当输入信号是模拟信号时，选择合适的工作点，可以得到变化规律相同的光功率信号。显然，输出特性的线性度越高，光电转换时的失真就越小。图 1.2.2 (a) 示出了模拟信号对光源调制的工作过程，图 (b) 为数字信号对光源的调制过程。

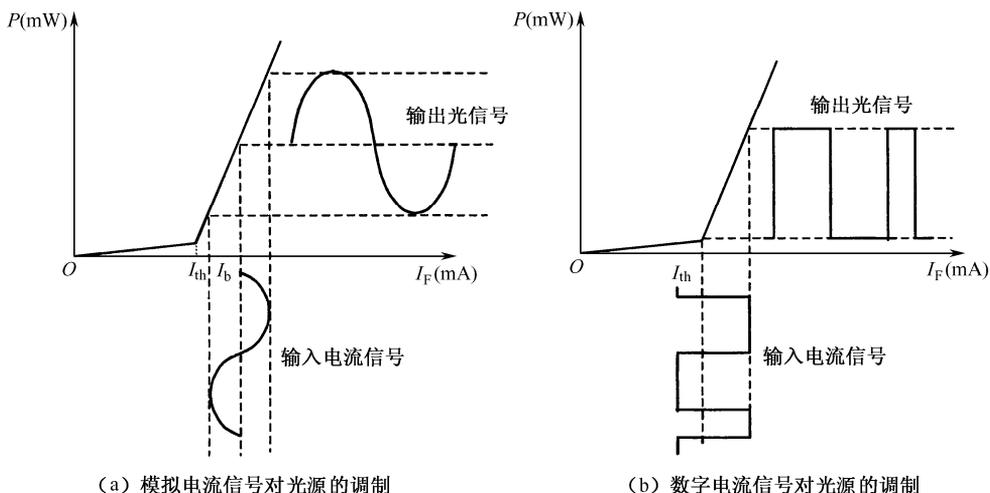


图 1.2.2 电信号对光源的调制过程

在此需要说明消光比的概念。消光比 (Extinction Ratio) 是分别代表逻辑 1 和逻辑 0 的最大功率和最小功率之比，通常以 dB 为单位来衡量，它是数字传输时光源的一项重要参数。作为一个调制好的光源希望全 0 码时没有光功率输出，否则它将使光纤系统产生噪声，造成接收机灵敏度降低。需要说明的是，我国对消光比的传统定义与上述刚好相反。

电信号对光源的调制有两种方式：一种称为直接强度调制 (Intensity Modulation)，如图 1.2.2 表明的那样，即用电信号对光源的注入电流进行调制，然后使输出光波的强度随调制信号而变化。图 1.2.3 (a) 为直接强度调制器原理框图。直接调制光载波的方式用得比较多，但由于它本质上是电领域的调制方式，所以受激光二极管调制特性的限制。当光纤通信向大容量高速化方向发展时，半导体光源本身的调制特性满足不了要求，则需要采用另一种调制方式——外调制方式来达到目的。图 1.2.3 (b) 示出了使用外调制器的光信号调制原理图。

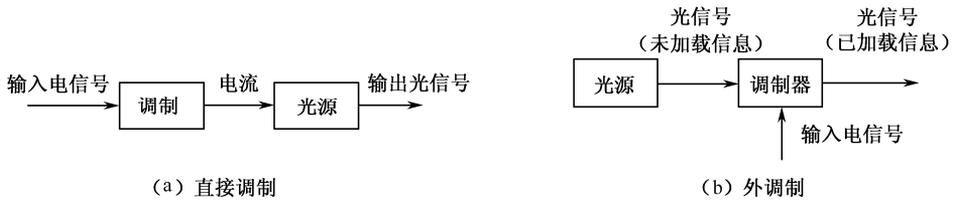


图 1.2.3 直接调制与外调制的原理框图

外调制器是利用晶体的电光、磁光和声光等效应对光辐射进行调制，即在光源光辐射产生后再加载调制信号。外调制器放置在光源输出端的光路上，在调制器上加调制电压后，使激光器输出的连续波，通过调制器转换成一个随时间变化的光输出信号。

目前在光纤通信系统使用的外调制器通常是铌酸锂 (LiNbO_3) 电光调制器。它采用了一个集成光学马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder) 构成，简称为 M-Z 调制器，图 1.2.4 示出了一种双电极驱动构成的铌酸锂光调制器的电光路方框图。

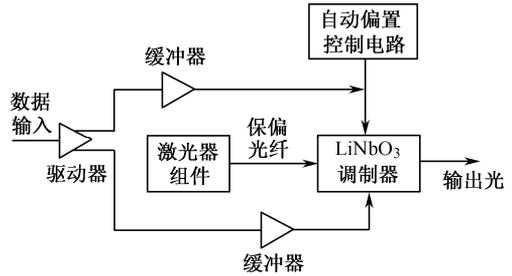


图 1.2.4 双电极驱动构成的 LiNbO_3 光调制器的电光路方框图

2. 光发射机的辅助电路

除光源外，光发射机还有与之匹配的直流偏置驱动电路、阻抗匹配电路、防止光从光纤返回的光隔离器，监视光源发射功率的监视光电二极管、自动功率控制电路和使光源恒温工作的温度控制系统。下面对其中主要部件的功能进行简单的介绍。

(1) 驱动电路。对于直接强度调制的光源，必须给它提供恒定偏置电流和已调制的信号，它才能正常工作。这个功能是由驱动电路完成的。一般来说，驱动电路是一种电流开关电路。对它的基本要求是，既要有快的开关速度，又要保持良好的电流脉冲波形，另外，还得考虑其温度系数。因为环境温度的波动会引起供给电流的波动，所以现在几乎所有高性能的激光二极管都已采用具有可调节电流和温控装置的电路。

(2) 自动功率控制电路 APC (Automatic Power Control)。激光二极管恒定的光输出功率对保证通信系统的正常工作有着至关重要的意义。而事实上，激光二极管的阈值电流容易随温度和器件的老化而变化，从而引起输出光功率的变化，所以必须配置自动功率控制电路。通过设置激光二极管背出光面的光电二极管对输出光的强度进行监测。光电二极管的输出被反馈给驱动电路，当光输出功率下降时，驱动电流增加，反之则减小，始终保持输出光功率为一恒定值。

(3) 自动温度控制电路 ATC (Automatic Temperature Control)。激光二极管的许多关键因素 (波长、阈值电流、效率、P-I 特性、斜率等) 都与二极管的结温有着密切的关系，比如，对于波长为 1550nm 器件，每增加 1°C ，频率变化 13GHz。工作温度还与激光二极管的寿命密切相关。据估算，每 30°C 的温升会使其寿命降低一个数量级。因此，激光二极管工作时要有尽可能低的和稳定的温度。

帕尔帖 (Peltier) 温控装置是常用的一种激光二极管温度控制部件。它利用半导体材料的帕尔帖效应制成。由 P 型和 N 型两种不同的半导体组成的电偶，当直流电流通过时，一端吸收热量而另一端放出热量。这种效应被称为帕尔帖效应，可见帕尔帖温控装置是一种转移

热的热电半导体器件，也称热电制冷器。它的散热方向取决于电流流动的方向，通常，由反馈回路中的温度传感器（热敏电阻）控制和供给温控装置组件电流的大小和极性。自动温度控制电路可使激光二极管的结温变化控制在 0.1°C 的范围内。

(4) 光隔离器。光隔离器的作用是保护光源的激活区免受回射光的影响。实际上，当激光入射到光纤的端面时，其中的一部分将被反射回光源处。此外，连接器和机械接头也会将光反射回激光二极管。而光源（特别是激光二极管）对这一反射光是十分敏感的。它会增加 LD 的相对强度噪声（光源的一项噪声指标），从而影响整个光纤通信系统的性能。

现在，人们已经将激光二极管、监视光电二极管、光隔离器、热电制冷器、温度传感器、控制电路、驱动电路、自动温度控制电路、自动功率控制电路、尾纤等制成为光发射模块，集成在一个管壳内并组成光发射功能的器件。这样器件功能更加完善，性能也更加优异，用户使用更加方便，系统设计更加简便。所以说，器件的模块化已经成为发展的必然趋势。图 1.2.5 为其功能框图。图 1.2.6 为某光发射模块的实物图。

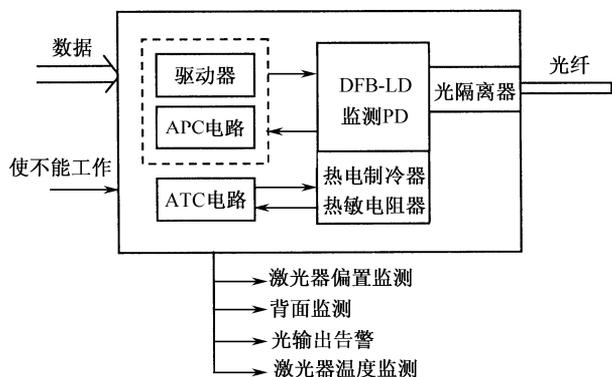


图 1.2.5 光发射模块功能框图

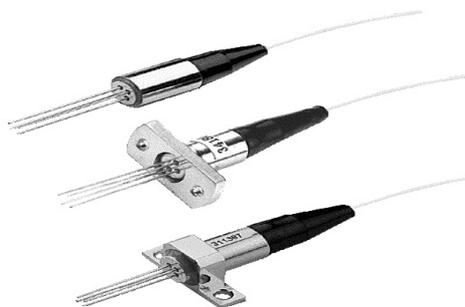


图 1.2.6 光发射模块实物图

1.2.2 光纤

1. 光纤结构

光纤是通信系统的传输介质，是由两种不同折射率的石英玻璃（ SiO_2 ）在高温下控制而成的。阶跃型光纤的基本结构如图 1.2.7 所示，内层为纤芯，作用是传输光信号，外层为包层，作用是使光信号尽可能封闭在纤芯中传输。为了将信号限制在纤芯中，必须在纤芯和包层的界面实现光的全内反射，如图 1.2.8 所示。为此要求纤芯的折射率比包层的折射率略大，在纤芯中掺入极少量的杂质（如 GeO_2 ）可达到这个目的。

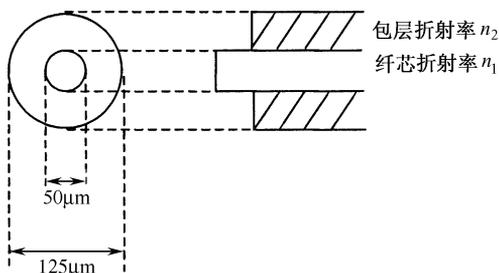


图 1.2.7 阶跃型光纤的基本结构

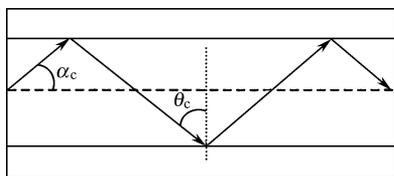


图 1.2.8 阶跃型光纤内部光的传输

设全反射的临界入射角为 θ_c ，则由光学计算公式可知

$$\sin \theta_c = n_2 / n_1 \quad (1.2.1)$$

式中， n_1 、 n_2 分别为纤芯和包层的折射率。图 1.2.8 中 α_c 称为临界传播角，它是光线发生全反射时与光纤纵向轴线之间的夹角，有

$$\alpha_c = \arcsin \sqrt{1 - (n_2 / n_1)^2} \quad (1.2.2)$$

要保证光线在光纤内全反射，必须有传播角

$$\alpha \leq \alpha_c \quad (1.2.3)$$

【例 1.2.1】 某种光纤的纤芯和包层的折射率分别为 1.48 和 1.46，求临界传播角。

解：由式 (1.2.2) 可知 $\alpha_c = \arcsin \sqrt{1 - (1.46/1.48)^2} = 9.4^\circ$

按照传送光的模式的不同，光纤分为单模光纤和多模光纤。单模光纤的纤芯直径大约几微米，主要传送 1550nm 波长的光，多模光纤的纤芯直径一般为几十微米，常用来传送 850nm 波长的光。单模光纤和多模光纤的包层直径一般都为 125 μm 。

2. 光缆

仅有纤芯和包层的光纤称为裸光纤，它的强度较差，柔韧性无法达到使用的要求。在光纤制造过程中，裸纤从高温炉拉出后，立即要经过涂覆层流水线进行涂覆。涂覆层的主要成分是环氧树脂和硅橡胶分子材料，具有如下的功能：

- ① 吸附性好，与裸光纤保持坚固的接触。
- ② 可剥离性，在光纤的连接中剥离力越小越好，以便于安装操作。
- ③ 柔韧性，可以保护光纤免受任何外部损伤。
- ④ 抗潮性，涂覆层可以保护光纤免受湿气影响，从而延缓光纤的老化，增强其稳定性。
- ⑤ 温度系数与裸光纤一致性，涂覆层的热膨胀系数应与裸光纤的热膨胀系数保持一致，否则，将会导致光纤发生压力的变化，造成光纤的微弯和较大的衰减。

涂覆层有单层和双层之分，在双层结构中，内层为软涂覆层，它提供较好的粘贴度和光纤衬垫。硬外层保护光纤以适用于多种环境及磨损。涂覆层的外径在 245~900 μm 之间。

经过一两次涂覆（套塑）的光纤虽然具有一定的抗拉强度，但还是比较脆弱，经不起弯曲、扭曲和侧压的作用，无法投入实际应用。为了能使光纤用于多种环境条件下并便于敷设施工，必须将光纤制成光缆。图 1.2.9 为光缆实物图。



图 1.2.9 光缆实物图

1.2.3 光接收机

光接收机的主要作用是将接收到的微弱光信号转变为电信号，再经放大和处理，恢复为原来的形式。光接收机由光电检测器、放大器和相关电路组成。

根据应用不同，光接收机又分为模拟光接收机和数字光接收机。图 1.2.10 示出了模拟光接收机的组成，RF 表示模拟射频信号，其中光电检测器 PD (Photo Diode) 是光接收机的核心。它的工作机理基于前面介绍的半导体材料的光电效应，光电检测器可以将光信号转变为电流信号。目前广泛使用的光电检测器有两种：本征型光电二极管（简称 PIN 管）和雪崩型光电二极管（简

称 APD)。PIN 光电二极管无放大能力，主要用于要求简单，性能不高的短距离通信系统，价格较为便宜。与 PIN 管比较起来，APD 具有内部增益高、响应速度快、光电转换效率高、光生电流大等特点，因此主要用于要求性能好、有高灵敏度的中长距离光纤通信系统中。对光检测器的主要要求是，高灵敏度，低噪声，响应速度快，足够的带宽，对温度变化不敏感等。

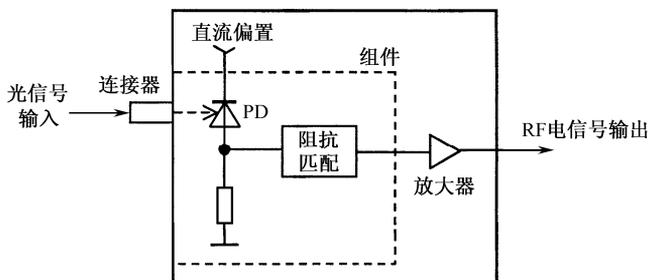


图 1.2.10 模拟光接收机的组成

对于光纤数字传输链路而言，由光发射机发出的光脉冲信号在沿着光纤传输时会发生衰减和失真，到达接收机经光检测器产生电流信号，经过放大器转换成电压信号后，还要用滤波器对失真的波形进行补偿，消除码间干扰并减小噪声影响。最后要用判决再生电路将滤波器的输出电压与阈值进行比较，再生出只有两个电平的数字信号，图 1.2.11 为数字信号在光纤链路上传输的示意图。

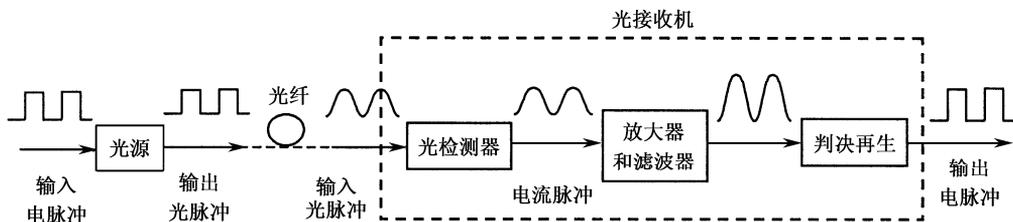


图 1.2.11 数字信号在光纤链路上传输示意图

将 PD 管、前置放大器、阻抗匹配和电路状态监视/警示电路及若干光学元件集成在一个管壳内可制成光接收模块，图 1.2.12 示出了光 CATV 接收模块的实物图。

光接收机的主要指标是灵敏度，它是指在满足给定误码率或信噪比条件下，接收机接收微弱信号的能力，工程上常用最低平均光功率 P_{\min} 来描述，灵敏度表示为

$$S_r = 10 \lg P_{\min} \quad (1.2.4)$$

式中， S_r 的单位为 dBm， P_{\min} 的单位为 mW。

光接收机的另一指标是动态范围 D ，它是指在保证系统误码率指标要求下，接收机的最大允许光功率和最小允许光功率之比，即

$$D = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}} \quad (1.2.5)$$

式中， D 的单位为 dB。

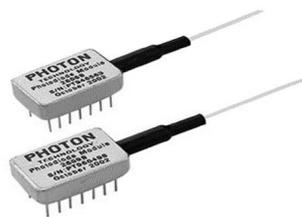


图 1.2.12 光 CATV 接收模块实物图

1.2.4 光放大器

光信号沿光纤传输一定距离后，会因为光纤的衰减特性而减弱，从而使传输距离受到限制。通常，对于多模光纤，无中继距离约为二十几千米，对于单模光纤，不到 80km。为了使信号传送的距离更大，就必须增强光信号。光纤通信早期使用的是光—电—光再生中继器，需要进行光电转换、电放大、再定时脉冲整形及电光转换。这种中继器适用于中等速率和单波长的传输系统。对于高速、多波长应用场合，则中继的设备复杂，费用昂贵。在光纤网络中，当有许多光发送器以不同比特率和不同格式将光发送到许多接收器时，无法使用传统中继器，因此产生了对光放大器的需要。经过多年的探索，科学家们已经研制出多种光放大器。光放大器的作用如图 1.2.13 所示。与传统中继器比较起来，它具有两个明显的优势，第一，它可以对任何比特率和格式的信号都加以放大，即光放大器对任何比特率和信号格式是透明的。第二，它不仅是对单个信号波长，而是在一定波长范围内对若干个信号都可以放大。

光放大器是基于受激辐射机理来实现入射光功率放大的，工作原理如图 1.2.14 所示。图中的激活介质为一种稀土掺杂光纤，它吸收了泵浦源提供的能量，使电子跳到高能级上，产生粒子数反转，输入信号光子通过受激辐射过程触发这些已经激活的电子，使它们跃迁到较低的能级，从而产生一个放大信号。泵浦源是具有一定波长的光能量源，以目前使用较为普及的掺铒光纤放大器来说，其泵浦光源的波长有 1480nm 和 980nm 两种，激活介质则为掺铒光纤。图 1.2.15 示出了掺铒光纤放大器中掺铒光纤（EDF）长度、泵浦光强度与信号光强度之间的关系。由图可知，泵浦光能量入射到掺铒光纤中后，将能量沿光纤逐渐转移到信号上，也即对信号光进行放大。当沿掺铒光纤传输到某一点时，可以得到最大信号光输出。所以对掺铒光纤放大器而言，有一个最佳长度，这个长度大约在 20~40m，要求 1480nm 泵浦光功率为数十毫瓦。

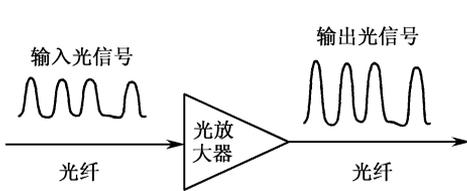


图 1.2.13 光放大器的作用

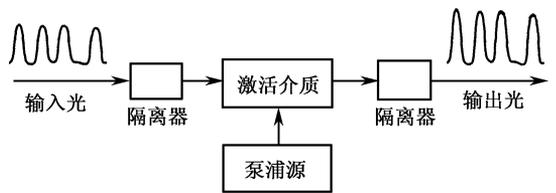


图 1.2.14 光放大器的原理

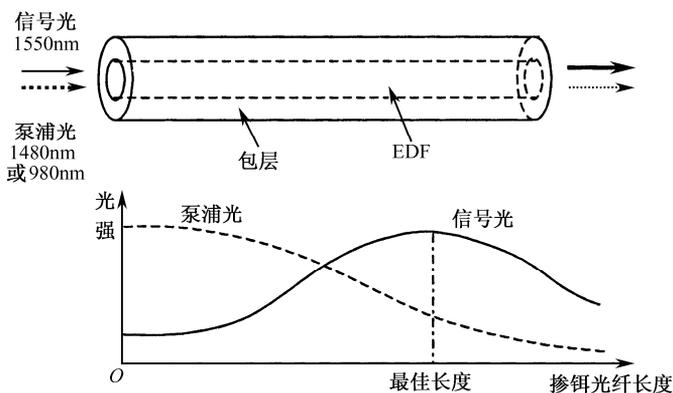


图 1.2.15 掺铒光纤中泵浦光功率与信号光功率之间的转换

需要指出的是，在图 1.1.1 关于光纤通信系统的构成中，再生中继器与光放大器的作用是不同的，用图 1.2.16 来说明。再生中继器可产生表示原有信息的新信号，消除脉冲信号传输后的展宽，将脉冲调整到原来水平，从这个意义上讲，光放大器并不能代替再生中继器。光放大器存在着噪声积累，而且不能消除色散对脉冲展宽的缺点。当信号的传输距离在 500~800 km 之间时，可采用光放大器来补偿信号的衰减，当超过这个距离时，再生中继器则是必不可少的。

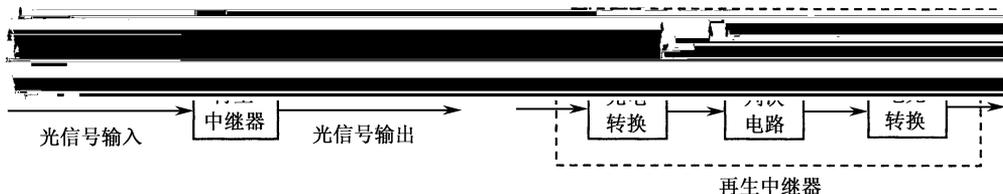


图 1.2.16 再生中继器

对光纤放大器的主要要求是，高增益，低噪声，高的输出光功率，低的非线性失真。图 1.2.17 示出了掺铒光纤放大器的实物图。



图 1.2.17 掺铒光纤放大器的实物图

1.3 光纤通信的基本问题

衰减和色散是因光纤特性而导致的光纤通信系统的基本问题，在传输光信号功率较高时，光纤的非线性效应影响则不能忽略。

1.3.1 衰减

这里的衰减指的是光信号功率在光纤传输过程中的损耗。它是由光纤特性决定的，也称为光纤衰减。光纤衰减是光纤最重要的特性之一，它在很大程度上决定了在无须信号放大和再生的条件下，光发射机和光接收机之间所允许的最大距离。由于光放大器、光中继器的制造、安装及维护费用较高，光纤衰减成为整个系统成本的决定性因素之一。

1. 衰减的表示

光纤衰减的特性用衰减系数 α 表示，光信号在光纤中传播时，其功率 P 随着传输距离的增加按指数形式衰减，即

$$dP/dz = -\alpha P \quad (1.3.1)$$

设起始处 ($z=0$) 的信号光功率为 $P(0)$ ，则在光纤中经过距离 z 的传播后，其值为

$$P(z) = P(0)e^{-\alpha z} \quad (1.3.2)$$

由此得到的衰减系数

$$\alpha = \frac{1}{z} \ln \frac{P(0)}{P(z)} \quad (1.3.3)$$

式中, α 单位为 (1/km); P 的单位为毫瓦 (mW)。

通常, 工程用 dB/km 作为光纤衰减的单位, 有

$$\alpha(\text{dB/km}) = \frac{10}{z} \lg \frac{P(0)}{P(z)} \quad (1.3.4)$$

以后如不加以说明, 均以式 (1.3.4) 的单位 dB/km 作为光纤衰减的单位。

【例 1.3.1】 一根光纤长 20km, 衰减为 0.5dB/km, 一端注入功率为 600 μW 的光信号, 求其输出光功率。

解: 在光通信系统中, 经常用 dBm 表示发射光功率, 接收光功率, 它是以 1mW 为基准的光功率相对量的单位, 用下式计算

$$P = 10 \lg(P_0)(\text{dBm}) \quad (1.3.5)$$

式中, P_0 的单位为 mW。显然 1mW 为 0dBm, 1 μW 为 -30dBm。

首先利用式 (1.3.5) 将输入光功率单位转换为 dBm, 有

$$P(0) = 10 \lg(600 \times 10^{-3}) = -2.2(\text{dBm})$$

再由式 (1.3.4), 可得到在 $z = 20\text{km}$ 时的输出功率 (用 dBm 表示), 即

$$P(20) = P(0) - \alpha z = -2.2(\text{dBm}) - 0.5(\text{dBm/km}) \times 20(\text{km}) = -12.2(\text{dBm})$$

换回到以 W 表示的单位。因为 $P(20)(\text{dBm}) = 10P'(20)$, $P'(20)$ 以 mW 为单位, 有

$$P'(20) = 10^{-12.2/10}(\text{mW}) = 60.2(\mu\text{W})$$

【例 1.3.2】 一段 12km 长的光纤线路, 其损耗为 1.5dB/km。试求: (1) 如果在接收端保持 0.3 μW 的接收光功率, 则发送端的功率至少为多少? (2) 如果光纤的损耗变为 2.5dB/km, 则所需的输入光功率为多少?

解: (1) 根据式 (1.3.4), 得到发送端的功率至少为

$$P(0) = P(12)10^{\alpha L/10} = 18.93\mu\text{W} = -17.2\text{dBm}$$

(2) 如果光纤的损耗变为 2.5dB/km, 则所需的输入光功率为

$$P(0) = P(12)10^{\alpha L/10} = 300\mu\text{W} = -5.2\text{dBm}$$

此题也可以用如下方法求解。

根据式 (1.3.5), 将接收端功率转换为 dBm 单位:

$$P(12) = 10 \lg(P) = -35.2\text{dBm}$$

(1) 发送端的功率为

$$P(0) = P(12) + \alpha z = -35.2\text{dBm} + 1.5\text{dB/km} \times 12\text{km} = -17.2\text{dBm}$$

(2) 光纤损耗变为 2.5dB/km, 则所需的输入功率为

$$P(0) = P(12) + \alpha z = -35.2\text{dBm} + 2.5\text{dB/km} \times 12\text{km} = -5.2\text{dBm}$$

由上述例题可以看到, 引入 dBm 单位后, 可以简化一些计算, 因此在工程应用中, 经常用 dBm 作为光功率的单位。

2. 衰减的原因

光纤衰减的原因有散射损耗、吸收损耗和弯曲损耗等, 下面分别介绍。

(1) 散射损耗

散射损耗是由于光纤材料密度的微观变化、成分的起伏、结构上的不完善及制造过程中产生的缺陷造成的。光在不均匀介质中的传播将被散射，散射效应破坏了在纤芯包层边界保持全反射的条件，部分光会穿出纤芯，造成功率损耗。这种散射也称为瑞利散射。它与波长的四次方成反比，在波长为 1550nm 时，瑞利散射损耗为 0.154dB/km。

(2) 吸收损耗

在光纤制造过程，光纤中的氧 (O) 与氢 (H) 相结合形成 OH^- 时，会造成对 1390nm 和 940nm 的光大量的吸收，如图 1.1.3 所示，它基于在本章 1.1 节中讨论的光的吸收机理。为了降低光纤的吸收损耗，已经研制出全波长光纤，它可在 1200~1650nm 范围内将损耗降得很低。 OH^- 也可以是因氢气进入光纤内部而形成的，例如在含有很多氢气的环境中使用光纤，或者光缆的金属部分在水中因腐蚀产生氢气时，都有可能出现光纤损耗大量增加的现象。

我们将 OH^- 引起的衰减称为杂质吸收损耗。除此之外，还有石英石材料固有的吸收，称之为内部吸收。当波长大于 $2\mu\text{m}$ 时，石英材料会产生谐振吸收光能，吸收带延伸到 1500~1700nm 波段，形成了光纤工作波长的上限。常用的石英光纤，内部吸收损耗在 1550nm 处，约为 0.02dB/km，但当波长为 1700nm 时，损耗增至 0.32dB/km，所以将 1650nm 看作为石英光纤工作波长的上限。

(3) 弯曲损耗

由于在光纤敷设过程中，不可避免地会遇到需要弯曲的场合，光线从光纤的平直部分进入弯曲部位时，原来的束缚光线在弯曲部位的入射角减小，使得光纤纤芯和包层界面上的全反射条件遇到破坏，光束的一部分就会从光纤的纤芯中逃离出去，造成到达目的地的光功率比从光源发出的进入光纤时的光功率小，这就是弯曲损耗，如图 1.3.1 所示。

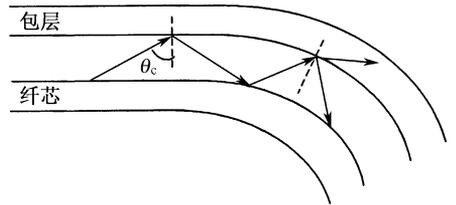


图 1.3.1 弯曲损耗

弯曲损耗是光信息传输衰减的主要原因之一，它与光纤敷设的弯曲半径有关，最小弯曲半径常作为光纤的一项参数给出。关于最小弯曲半径的经验数据是，对于长期应用，弯曲半径应超出光纤包层直径的 150 倍；对于短期应用，应超过包层直径的 100 倍。如果包层直径为 $125\mu\text{m}$ 的话，这两个数值应分别为 19mm 和 13mm。

弯曲损耗的另一种形式是微弯损耗，它是由光纤受到侧向应力而产生微小形变而引起的，同样因不满足全反射条件而造成能量的泄漏。

利用光纤的弯曲损耗特性，可以在光纤链路上引入一些可控的衰减。在需要对光进行可控衰减时，通过将光纤绕上几圈就可以实现，所绕圈数和半径均可控制衰减量。

1.3.2 色散

从现象上看，色散导致光纤中的光信号在传输过程中产生失真并随着传输距离的增加越来越严重。对数字传输而言，色散造成光脉冲的展宽，致使前后脉冲相互重叠，引起数字信号的码间串扰，造成误码率增加；对模拟传输而言，它会限制带宽，产生谐波失真，使得系统的信噪比下降。从理论上分析，色散是由于光波中的不同频率分量以不同速度传输而产生不同的时间延迟的一种物理效应。

光纤色散主要包括模式色散、波导色散和材料色散。对于多模光纤，模式色散是主要的，

材料色散较小，波导色散一般可以忽略；对于单模光纤，只有一个光模式（光线）在光纤中传输，所以不存在模式色散，只有材料色散和波导色散，而且材料色散是主要的，波导色散相对较小。下面对这几种种色散加以介绍。

1. 模式色散

在多模光纤中，纤芯的直径比较大，光源入射到纤芯中的光以一组独立的光线传播。这组光线以不同的入射角传播，入射角的范围从零度（直线）到临界传播角，如图 1.3.2 所示。我们将这些以不同传播角传输的光线称为不同的模式。在多模光纤中可以传播数百个模式的光波，显然，以临界传播角入射的光线经历的路程最长，所以它的轴向传播速度最慢；而与光纤横截面垂直入射的光线传播速度最快。

对于入射的光脉冲（在数字信号中表示 1），它可以分解成各个模式所携带的一组脉冲，如图 1.3.3 所示，由于它们各自在光纤中传输的时间不同，到光纤的输出端，各个模式的光脉冲组合起来，就形成了一个脉宽增加的光脉冲。

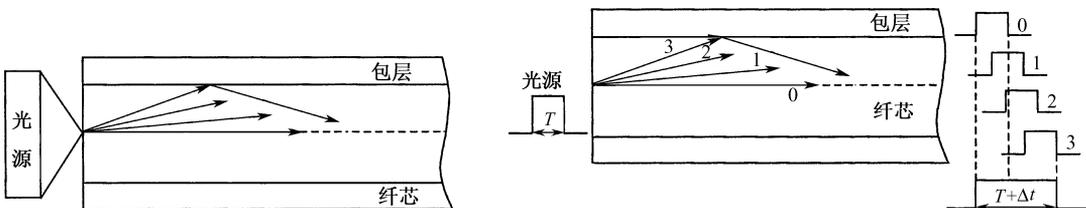


图 1.3.2 不同入射角的光线代表不同的模式 图 1.3.3 脉冲因多个模式的存在而引起的展宽——模式色散

我们将因多个不同模式的存在而引起脉冲展宽称为模式色散或模间色散。脉冲展宽的计算如下：设光纤的长度为 L ，最低模式（也称为零级模式）沿中心轴线到达光纤输出端所需时间 t_0 为

$$t_0 = L/v \tag{1.3.6}$$

式中， $v = c/n_1$ 为光在折射率为 n_1 的纤芯中传输的速度； c 为真空中的光速，最高模式（以临界角传播的光线）所需时间 t_c 为

$$t_c = L/(v \cos \alpha_c) \tag{1.3.7}$$

式中， α_c 为临界传播角， $\cos \alpha_c = n_2/n_1$ 。脉冲展宽时间为

$$\Delta t = t_c - t_0 = \frac{L}{v} \left(\frac{1}{\cos \alpha_c} - 1 \right) = \frac{Ln_1}{c} \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) \tag{1.3.8}$$

习惯上记为

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_2} \tag{1.3.9}$$

为相对折射率，式 (1.3.8) 可以表示为

$$\Delta t = \frac{Ln_1}{c} \Delta \tag{1.3.10}$$

很显然，如果光纤中传输的光只有零级模式，就可以消除模间色散；如果减小纤芯直径的尺寸，就可以减少模式数量；另外由式 (1.3.10) 可知，减小相对折射率，也可以有效地控制模间色散，这些就是单模光纤设计的基本思路。典型的单模光纤的纤芯直径和相对折射率分别是 $8.3\mu\text{m}$ 和 0.37% ，而渐变折射率光纤的这两个的数值分别是 $50\mu\text{m}$ 和 2% 。

【例 1.3.3】 一阶跃折射率光纤，已知 $n_1 = 1.486$ ， $n_2 = 1.472$ ，仅考虑模式色散，计算每 1km 长度的脉冲展宽。

解：利用式 (1.3.10)，光纤长度单位和光速单位分别取 km 和 km/s，则有

$$\Delta t = \frac{Ln_1}{c} \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) = \frac{1 \times 1.486}{3 \times 10^5} \left(\frac{1.486 - 1.472}{1.472} \right) = 4.71 \times 10^{-8} (\text{s}) = 47.1 (\text{ns})$$

即光脉冲传输 1km 后宽度扩展了 47.1ns。

2. 波导色散

引起波导色散的原因是：实际上进入单模光纤中的光信号功率大约只有 80% 在纤芯中传播，另外 20% 在包层传输，由于纤芯和包层有不同的折射率，所以这两部分的传输速度不同，在包层中传播的光功率速度要更快一些，因而在光纤输出端，脉冲会展宽。

波导色散引起的单位长度脉冲展宽 $\Delta\tau$ 可由下式计算，即

$$\Delta\tau = \frac{\Delta t}{L} = |D_w(\lambda)| \Delta\lambda \quad (1.3.11)$$

式中， $D_w(\lambda)$ 是波导色散系数，单位为 $\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ，它与光纤的设计参数有关； $\Delta\lambda$ 为光源的线宽，即光源辐射光的波长范围； L 为光纤长度。

3. 材料色散

材料色散是由于纤芯材料的折射率随波长变化，引起各个模式的群速率（光脉冲包络线速度）都随着波长的变化而造成的。在单模光纤内，即使光经过完全相同的路径，也会发生脉冲的展宽，因为光源发出的光不是单一波长的，而是存在一定的波长范围 $\Delta\lambda$ 。

材料色散的单位长度脉冲展宽可表示为

$$\Delta\tau = \Delta t / L = |D_m(\lambda)| \Delta\lambda \quad (1.3.12)$$

式中， $D_m(\lambda)$ 为材料色散系数，单位为 $\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。

波导色散和材料色散的总和称为色度色散，图 1.3.4 为单模光纤的色散系数。

【例 1.3.4】 光源 LD 的线宽 $\Delta\lambda = 2\text{nm}$ ，工作波长为 1310 nm，计算单模光纤每 km 因材料色散造成的脉冲展宽。

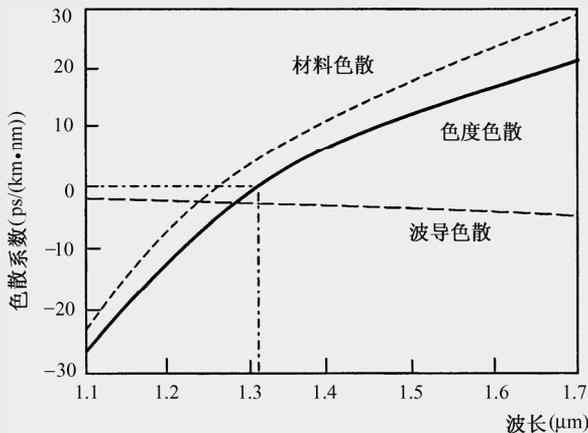


图 1.3.4 单模光纤中波导色散和材料色散与波长的关系

解：由图 1.3.4 可知，在 $\lambda = 1310 \text{ nm}$ 处，光纤的材料色散系数为 $D_m(\lambda) = 2 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ，所以有

$$\frac{\Delta t}{1 \text{ km}} = |D_m(\lambda)| \Delta\lambda = 2 \times 2 (\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})) \cdot \text{nm} = 4 (\text{ps}/\text{km})$$

1.3.3 非线性效应

在常规光纤系统中，光纤一般呈现线性传输的特性，但当入射到光纤中的光功率较大时，光纤对光的响应将呈现非线性，光纤的参数不再是恒定的，而是依赖于光强的大小。

光纤中的非线性效应主要有自相位调制 SPM(Self Phase Modulation)、受激拉曼散射 SRS(Stimulated Raman Scattering)、受激布里渊散射 SBS(Stimulated Brillouin Scattering)、交叉相位调制 XPM(Cross Phase Modulation) 和四波混频 FWM(Four Wave Mixing)。

1. 自相位调制

自相位调制是指当输入光信号的光强变化时，光纤的折射率随之改变，从而引起光波的相位产生变化，与光纤的色散相位结合后，将导致光波频谱展宽，并随长度的增加而积累。SPM 对高速窄脉冲的传输影响较大。

2. 交叉相位调制

交叉相位调制是指当两个或多个不同波长的光波在光纤中同时传输时，它们将通过光纤的非线性而相互影响，导致某个波长光信号的相位受到其他波长光信号功率的调制，引起信道间的串音。

3. 四波混频

四波混频是指当多个具有较强功率的光波信号在光纤中混合传输时，将导致产生新的波长成分。四波混频不仅导致信道的光能损耗，信噪比下降，而且还会产生信道干扰，限制光纤通信系统的容量。

4. 受激散射

受激散射分为受激拉曼散射和受激布里渊散射。受激拉曼散射是指当较强功率的光入射到光纤中时，会引起光纤材料中的分子振动，对入射光产生散射作用，它可以造成波分复用系统中的短波长信道产生过大的信号衰减，从而限制了系统的信道数目。

受激布里渊散射与受激拉曼散射相似，只不过强光入射到光纤中时引起的是声子振动，散射光方向与光传输方向相反。当光强达到某一数值，将产生大量后向传输的波，对光通信造成不良的影响。

光纤中的非线性效应，一方面可以引起传输信号的损耗、信道之间的串话、信号频率的移动等不良后果，另一方面又可以被利用来开发新型器件，如激光器、放大器、调制器等。另外，四波混频效应可以实现波长变换，自相位调制与光纤色散相互作用可以形成光孤子，使光孤子通信成为可能。

在光纤通信系统中，高输出功率的激光器和低损耗单模光纤的使用，使得光纤中的非线性效应越来越显著，这是因为单模光纤中的光场主要束缚于很细的纤芯内，场强非常大，低损耗又使得大的场强可以维持很长距离的缘故，对非线性效应有足够的重视。

1.4 光纤通信系统的主要性能指标

1.4.1 比特率和带宽

比特率和带宽是衡量数字通信系统和模拟通信系统的主要指标。

1. 比特率

比特率也称为信息速率，是信道上每秒钟内所传输的比特数，单位为比特/秒，写成 b/s，常用符号 B 表示。在数字光纤通信系统中，数字信号的“1”、“0”用光脉冲的“有”、“无”来表示，因为光纤存在着色散效应，光脉冲沿着光纤传输会慢慢展宽，两个相邻的光脉冲传输一定距离后会发生重叠，从而使接收端设备不能做出正确的判断，如图 1.4.1 所示。

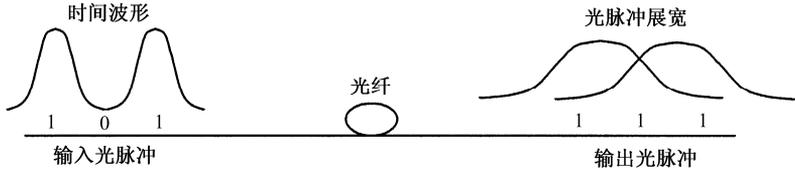


图 1.4.1 光纤色散效应形成的比特率限制

假设输入光脉冲是宽度为 T 矩形，到达接收端的延迟和展宽分别是 t 和 Δt ，为了将相邻的两个脉冲分辨出来，要求它们的间距不小于 $2\Delta t$ ，这就要求输入光脉冲的间距也不小于 $2\Delta t$ ，如图 1.4.2 所示。于是得到最大比特率的计算式为

$$B_{\max} = \frac{1}{2\Delta t} \quad (1.4.1)$$

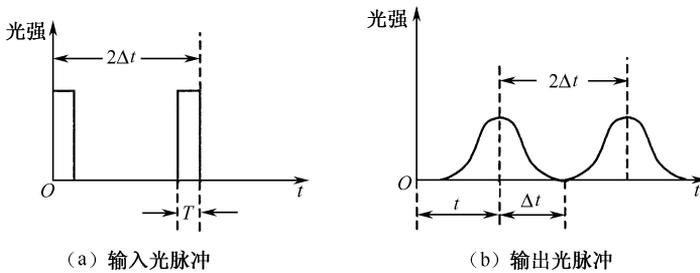


图 1.4.2 比特率与脉冲展宽

【例 1.4.1】 计算例 1.3.2 中可传输光脉冲的最大比特率。

解：假设输入光脉冲的宽度 T 与模式色散产生的展宽 Δt 相比可以忽略不计，则最大比特率为

$$B_{\max} = \frac{1}{2\Delta t} = \frac{1}{2 \times 4.71 \times 10^{-8}} = 10.6(\text{Mb/s})$$

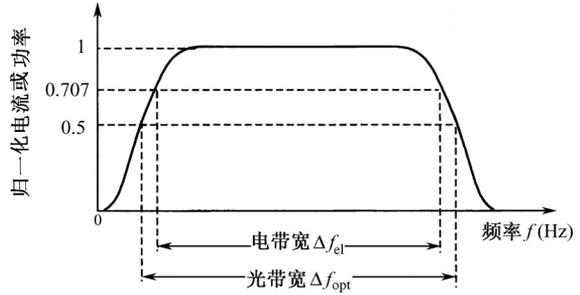
光纤色散是比特率受限的主要原因。为了解决这个问题，研制出了多种类型的光纤和各种补偿色散的技术，如渐变折射率光纤，色散补偿光纤等。

需要说明的是数字光纤通信系统的比特率除了受光纤限制外，还受到一些关键器件的影响，如光源、光检测器和光放大器等，人们一直在致力于高速光电子器件的研制，以适应高速光通信的发展。

2. 带宽

带宽是一个频率范围，在这个频率范围之内，信号可以不失真地进行传输，它反映了模拟传输系统运载信息的能力。带宽分为电带宽和光带宽两种表述，如图 1.4.3 所示，它们分别用 Δf_{el} 和 Δf_{opt} 表示。

由于光纤带宽也受限于其色散效应，所以它与比特率之间存在着对应的关系，这将在下一章讨论。



1.4.2 传输距离

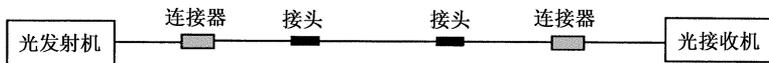
这里讨论的传输距离指的是中继距离。光纤的衰减和色散是限制传输距离的两大主要因素，而它们对传输距离影响程度与工作波长以及比特率有关，由图 1.1.3 可见，在短波窗口 850nm 波段，光纤存在着较大的损耗，大约为 2dB/km，根据传输信息的比特率不同，中继距离一般在 10~30km 之间，在长波段窗口，尤其在 1550nm 波长处，光纤存在最低损耗，中继距离最大可达 200km。

仅考虑光纤损耗，光信号沿光纤传输的最大距离 L 可用式 (1.3.4) 计算，将它改写为

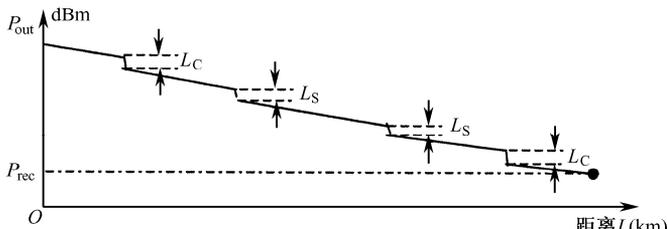
$$L = + \frac{10}{\alpha_f} \lg \frac{P_{out}}{P_{rec}} \quad (1.4.2)$$

式中， α_f 为光纤的损耗，单位为 dB/km，包括熔接和连接损耗； P_{out} 为光源最大平均输出功率； P_{rec} 为接收机探测器的最小平均接收光功率，两者单位均为 mW。

图 1.4.4 为只考虑光纤损耗的传输系统示意图。图中的接头是用熔接机将光纤连接起来时形成的，因接头引起的损耗 L_S 对单模光纤来说可以做到小于 0.1dB。连接器也是连接光纤的方式之一，它是用高精度结构的机械装置使光纤纤芯紧密接触的，光纤纤芯接触得越紧，同心度越高，则连接损耗 L_C 越小。单模光纤使用连接器相连时，连接损耗可以做到 0.5dB 以下。



(a) 传输系统



(b) 损耗

图 1.4.4 光纤传输系统及损耗

当光纤系统的信息传输速率较高时，色散对传输距离起到主要的限制作用，图 1.4.5 示出了各种类型光纤的传输距离与传输速率之间的关系曲线，图中实线表示损耗对传输距离和比特率的限制，虚线表示受色散限制。各种光纤的意义将在第 2 章中做进一步的介绍。