

另一个组成要素是相位调制，这是一种根据信号的相位来对应 0 和 1 的方式。Modem 产生的信号是以一定周期振动的波，如图 4.5 所示，振动的起始位置不同，波的形状也就不同。如果将波的一个振动周期理解为一个圆，则起始位置就可以用 0 度到 360 度的角度来表示，这个角度就是相位，用角度来对应 0 和 1 的方式就叫作相位调制。例如，从 0 度开始的波为 0，从 180 度开始的波为 1，这是一种最简单的对应关系，如图 4.4 (c) 所示。和振幅调制一样，相位调制也可以通过将角度划分为更细的级别来增加对应的比特数量，从而提高速率。但是，角度太接近的时候也容易产生误判，因此这样提升速率还是有限度的。

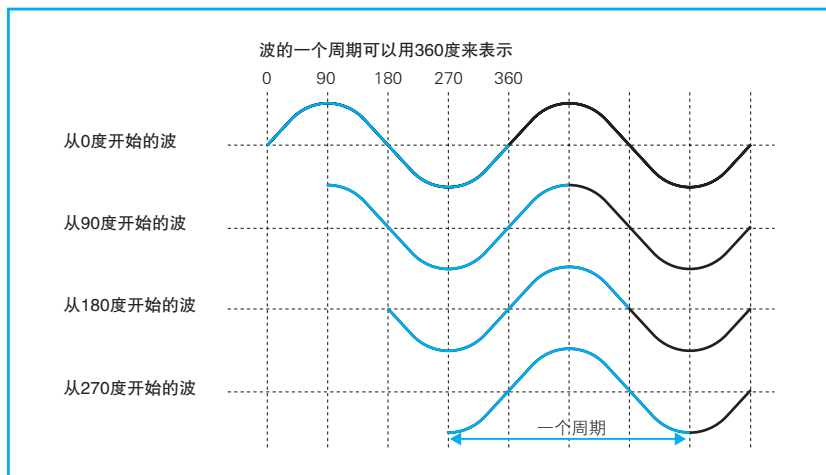


图 4.5 波的相位

ADSL 使用的正交振幅调制就是将前面这两种方式组合起来实现的。图 4.4 (d) 就是将图 4.4 (b) 和图 4.4 (c) 组合起来的一个例子，大家应该一看就明白了。如果信号的振幅可以表示 1 个比特，相位可以表示 1 个比特，那么加起来就可以表示 2 个比特。因此，将两种方式组合起来，正交振幅调制就可以用一个波表示更多的比特，从而提高传输速率。

正交振幅调制中，通过增加振幅和相位的级别，就可以增加能表示的

比特数。例如，如果振幅和相位各自都有 4 个级别，那么组合起来就有 16 个级别，也就可以表示 4 个比特的值。当然，和单独使用振幅调制或相位调制的情况一样，级别过多就容易发生误判，因此这种方法提升的速率是有限度的。

4.1.5 ADSL 通过使用多个波来提高速率

图 4.4 的例子中的信号是一个频率的波，实际上信号不一定要限制在一个频率。不同频率的波可以合成，也可以用滤波器从合成的波中分离出某个特定频率的波。因此，我们可以使用多个频率合成的波来传输信号，这样一来，能够表示的比特数就可以成倍提高了。

ADSL 就是利用了这一性质，通过多个波增加能表示的比特数来提高速率的。具体来说，如图 4.6 所示，ADSL 使用间隔为 4.3125 kHz 的上百个不同频率的波进行合成，每个波都采用正交振幅调制，而且，根据噪声等条件的不同，每个波表示的比特数是可变的。也就是说，噪声小的频段可以给波分配更多的比特，噪声大的频段则给波分配较少的比特^①，每个频段表示的比特数加起来，就决定了整体的传输速率。

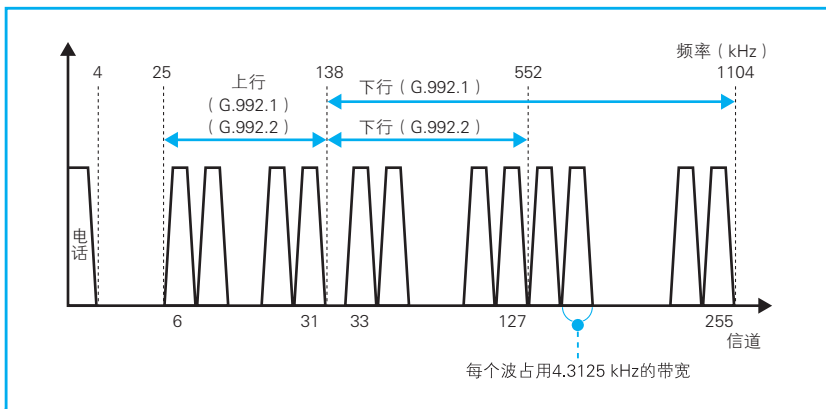


图 4.6 ADSL 使用的波的频率

① 一般情况下，一个波可表示几个比特到几十个比特。

ADSL 技术中，上行方向（用户到互联网）和下行方向（互联网到用户）的传输速率是不同的，原因也在这里。如果上行使用 26 个频段，下行则可以使用 95 个或者 223 个频段，波的数量不同，导致了上下行速率不同。

当然，下行使用的频段较高，这些信号容易衰减而且更容易受到噪声的影响，因此这些频段可能只能表示较少的比特数，或者干脆无法传输信号。距离越远，频率越高，这种情况也就越显著，因此如果你家距离电话局太远，速率就会下降。

噪声和衰减等影响线路质量的因素在每条线路上都不同，而且会随着时间发生变化。因此，ADSL 会持续检查线路质量，动态判断使用的频段数量，以及每个频段分配到的比特数。具体来说，当 Modem 通电后，会发送测试信号，并根据信号的接收情况判断使用的频段数量和每个频段的比特数，这个过程称为训练（握手），需要几秒到几十秒的时间。

4.1.6 分离器的作用

ADSL Modem 将信元转换为电信号之后，信号会进入一个叫作分离器的设备，然后 ADSL 信号会和电话的语音信号混合起来一起从电话线传输出去。在信号从用户端发送出去时，电话和 ADSL 信号只是同时流到一条线路上而已，分离器实际上并没有做什么事。

分离器的作用其实在相反的方向，也就是信号从电话线传入的时候。这时，分离器需要负责将电话和 ADSL 的信号进行分离（图 4.7）。电话线传入的信号是电话的语音信号和 ADSL 信号混合在一起的，如果这个混合信号直接进入电话机，ADSL 信号就会变成噪音，导致电话难以听清。为了避免这样的问题，就需要通过分离器将传入的信号分离，以确保 ADSL 信号不会传入电话机。具体来说，分离器的功能是将一定频率以上的信号过滤掉，也就是过滤掉了 ADSL 使用的高频信号，这样一来，只有电话信号才会传入电话机，但对于另一头的 ADSL Modem，则是传输原本的混合信号给它。ADSL Modem 内部已经具备将 ADSL 频率外的信号过滤掉的功能。

能，因此不需要在分离器进行过滤^①。

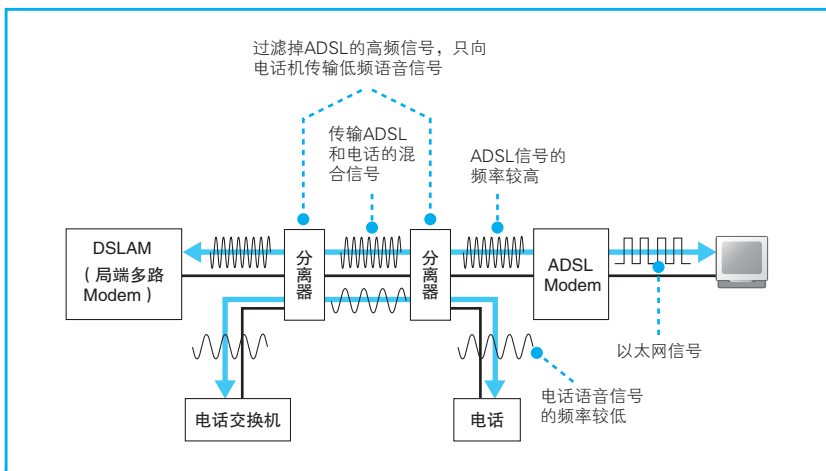


图 4.7 分离器的作用

大家可能会认为分离器的功能只是过滤掉高频信号，防止 ADSL 对电话产生干扰，而实际上它还可以防止电话对 ADSL 产生干扰。如果没有分离器，拿起电话听筒接通电话的状态，和放下听筒挂断电话的状态下，信号的传输方式是不同的。当放下听筒时，电话机的电路和电话线是断开的，当拿起听筒时电话机就和电话线相连，电话机的信号就会传到电话线上。这两种状态的差异会导致噪声等线路状态的改变，如果 ADSL 通信过程中拿起话筒导致线路状态改变，就需要重新训练（握手），这就会导致几十秒的通信中断，分离器可以防止发生这样的问题。当然，也有一种技术能够快速重新握手，即便没有分离器也不会影响 ADSL 通信，G.992.2 的 ADSL 规格就包含这种技术，但 ADSL 信号还是会影响电话，因此 G.992.2 的 ADSL 规格中一般还是需要使用分离器。

^① 电话局端也有分离器，功能是一样的。

4.1.7 从用户到电话局

从分离器出来，就是插电话线的接口，信号从这里出来之后，会通过室内电话线，然后到达大楼的 IDF^① 和 MDF^②，外面的电话线在这里和大楼内部的室内电话线相连接。如果是独栋住宅，就可以将室外线和室内线直接连起来。通过配线盘之后，信号会到达保安器。保安器是为了防止雷电等情况下电话线中产生过大电流的一种保护装置，内部有保险丝。

接下来，信号会进入电线杆上架设的电话电缆。电话线是一种直径 $0.32 \sim 0.9 \text{ mm}$ ^③ 的金属信号线，这些信号线如图 4.8 所示被捆绑在一起。

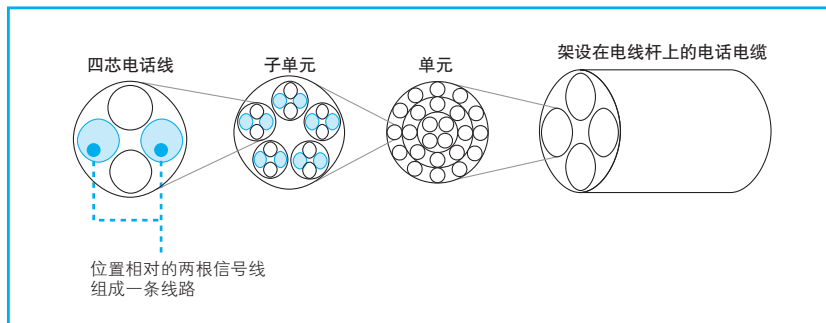


图 4.8 多条信号线捆绑在一起形成电话电缆

电话电缆在用户住宅附近一般是架设在电线杆上，但中途会沿电线杆侧面的金属管进入地下。由于电话线必须进入很多住宅和大楼，所以电话局附近就会集结数量庞大的电缆，这么多电缆要通过电线杆引入电话局是非常不现实的，电话局周围得密密麻麻地立满了电线杆，而且电线杆上架设过多的电缆，还会产生防灾方面的问题。因此，在电话局附近，电话线都是埋在地下的。由于电话局附近的地下电缆很多，集中埋设电缆的地方

- ① IDF: Intermediate Distribution Frame, 中间配线盘。
- ② MDF: Main Distribution Frame, 主配线盘(总配线架)。
- ③ 信号线的直径不同，信号衰减率等特性也不同，线越细衰减率越高，因此距离电话局近的地方使用细线，当需要延伸较远的距离时使用粗线。

就形成了一条地道，这部分称为电缆隧道（如照片 4.1）。通过电缆隧道进入电话局后，电缆会逐根连接到电话局的 MDF 上。



照片 4.1 电缆隧道

4.1.8 噪声的干扰

电话电缆中的信号也会受到噪声的干扰。虽然电话线和以太网双绞线的结构有所不同，但它们都是用金属信号线传输电信号，本质上是共通的。也就是说，电话线也会受到来自外部的噪声和来自内部的噪声（串扰^①）的干扰，导致信号失真。此外，电话线原本的设计并没有考虑到传输 ADSL 这样的高频信号，从这个角度上可以说它比以太网双绞线更容易受到噪声的干扰。

不过，电话线受到干扰的方式和双绞线有些不同。双绞线中只有一路方波信号，信号失真后就无法读取还原成数字信号，于是就会产生错误，但 ADSL 信号受到干扰后并不会立即造成错误。ADSL 信号分布在多个频段上，只有和噪声频率相同的信号会受到影响而无法读取，即可用的信号数量减少，结果导致速率下降。

因此，电话线架设在噪声比较多的地方时，可能就会导致速率下降，

① 串扰：信号线本身泄漏电磁波而产生的噪声对电缆内部相邻信号线产生干扰。3.1.3 节有相关介绍。

比如电车线路旁边。电车的受电弓 (pantograph) 从架空接触网获取电力时会产生电火花释放噪声, ADSL 会因此受到干扰, 导致速率下降。此外, ADSL 还会受到 AM 电台广播的干扰。

电缆内部产生的噪声也会形成干扰。图 4.8 中的四芯线内部, 或者相邻单元附近的附近如果同时存在 ADSL 和 ISDN 信号线, ISDN 发出的噪声就会干扰 ADSL。ADSL 刚刚开始普及的时候, 大家还都比较关注防止 ISDN 干扰的技术, 不过现在防止 ISDN 干扰的技术已经形成了, 因此在使用 ADSL 时已经基本上没必要在意 ISDN 线路的问题了。

4.1.9 通过 DSLAM 到达 BAS

信号通过电话线到达电话局之后, 会经过配线盘、分离器到达 DSLAM^① (图 4.3 ⑨)。在这里, 电信号会被还原成数字信息——信元 (图 4.3 ⑩)。DSLAM 通过读取信号波形, 根据振幅和相位判断对应的比特值, 将信号还原成数字信息, 这一过程和用户端的 ADSL Modem 在接收数据时的过程是一样的。因此, 如果在电话局里安装一大堆和用户端一样的 ADSL Modem, 也可以完成这些工作, 只不过安装这么多 Modem 需要占用大量的空间, 而且监控起来也非常困难。因此, 电话局使用了 DSLAM 设备, 它是一种将相当于很多个 ADSL Modem 的功能集中在一个外壳里的设备。

不过, DSLAM 和用户端 ADSL Modem 相比还是有一个不同的地方。用户端 ADSL Modem 具备以太网接口, 可以与用户端的路由器和计算机交互, 收发以太网包, 而 DSLAM 一般不用以太网接口, 而是用 ATM 接口, 和后方路由器收发数据时使用的是原始网络包拆分后的 ATM 信元形式^②。

-
- ① DSLAM: DSL Access Multiplexer, 数字用户线接入复用设备。它是一种电话局用的多路 ADSL Modem, 可以理解为将多个 ADSL Modem 整合在一个外壳里的设备。
- ② 也有一些 DSLAM 是不将网络包拆分成 ATM 信元的, 而是直接以网络包的状态转换成 ADSL 信号, 这样的 DSLAM 在和后方路由器收发数据时也是使用包的形式。

DSLAM 具有 ATM 接口，和后方路由器收发数据时使用的是原始网络包拆分后的 ATM 信元形式。

信元从 DSLAM 出来之后，会到达一个叫作 BAS 的包转发设备（图 4.3⑪）。BAS 和 DSLAM 一样，都具有 ATM 接口，可以接收 ATM 信元，还可以将接收到的 ATM 信元还原成原始的包（图 4.3⑫）。到这里，BAS 的接收工作就完成了，接下来，它会将收到的包前面的 MAC 头部和 PPPoE 头部丢弃，取出 PPP 头部以及后面的数据（图 4.3⑬）。MAC 头部和 PPPoE 头部的作用是将包送达 BAS 的接口，当接口完成接收工作后，它们就完成了使命，可以被丢弃了。具有以太网接口的路由器在接收到包之后也会丢弃其中的 MAC 头部，道理是一样的。接下来，BAS 会在包的前面加上隧道专用头部^①，并发送到隧道的出口（图 4.3⑭）^②。

然后，网络包会到达隧道出口的隧道专用路由器（图 4.3⑮），在这里隧道头部会被去掉，IP 包会被取出（图 4.3⑯），并被转发到互联网内部（图 4.3⑰）。

BAS 负责将 ATM 信元还原成网络包并转发到互联网内部。

4.2 光纤接入网（FTTH）

4.2.1 光纤的基本知识

通过 ADSL 接入网和 BAS 之后，网络包就到达了互联网内部，在继续探索之前，我们再来介绍另一种接入网技术，它的名字叫 FTTH，是一种基于光纤的接入网技术。FTTH 的关键点在于对光纤的使用，所以我们

① 一般情况下使用的隧道技术为 L2TP，在这种情况下就会加上 L2TP 头部。

② 这部分的具体工作过程，我们会在后面 4.3 节探索 BAS 的时候介绍。

先来介绍一些光纤的基本知识。

光纤的结构如图 4.9 所示，它是由一种双层结构的纤维状透明材质（玻璃和塑料）构成的，通过在里面的纤芯中传导光信号来传输数字信息（图 4.10）。ADSL 信号是由多个频段的信号组成的，比较复杂，但光信号却非常简单，亮表示 1，暗表示 0。

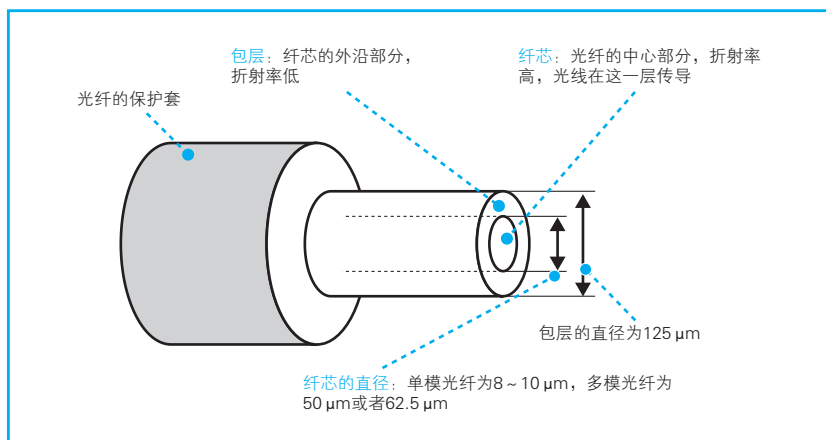


图 4.9 光纤的结构

不过，数字信息并不能一下子变成光信号，而是需要像图 4.10 所示的这样，先将数字信息转换成电信号，然后再将电信号转换成光信号。这里的电信号非常简单，1 用高电压表示，0 用低电压表示。将这样的电信号输入 LED、激光二极管等光源后，这些光源就会根据信号电压的变化发光，高电压发光亮，低电压发光暗。这样的光信号在光纤中传导之后，就可以通过光纤到达接收端。接收端有可以感应光线的光敏元件，光敏元件可以根据光的亮度产生不同的电压。当光信号照射到上面时，光亮的时候就产生高电压，光暗的时候就产生低电压，这样就将光信号转换成了电信号。最后再将电信号转换成数字信息，我们就接收到数据了。

这就是光纤的通信原理。

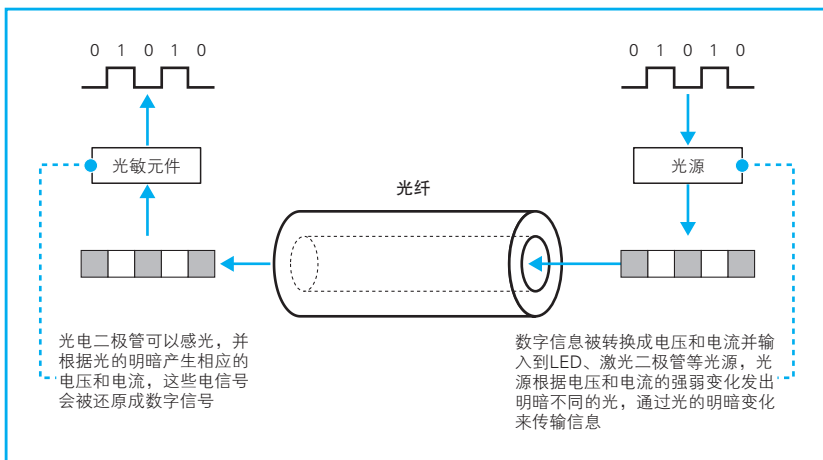


图 4.10 光通信的原理

4.2.2 单模与多模

光纤通信的关键技术就是能够传导光信号的光纤。光在透明材质中传导似乎听起来很简单，但实际上光的传导方式是非常复杂的，不同材质的光纤其透光率和折射率也不同，纤芯的直径等因素也会影响光的传导。其中，纤芯的直径对光的传导影响很大，要理解这一点，我们得先来看看光在光纤中是如何传导的。

首先，我们来看看光源发出的光是如何进入纤芯的。光源在所有方向上都会发光，因此会有各种角度的光线进入纤芯，但入射角度太大的光线会在纤芯和包层（纤芯外沿部分）的边界上折射出去，只有入射角较小的光线会被包层全反射，从而在纤芯中前进（图 4.11）。

不过，也不是所有入射角小的光线都会在纤芯中传导。光也是一种波，因此光也有如图 4.5 中那样的相位，当光线在纤芯和包层的边界上反射时，会由于反射角产生相位变化。当朝反射面前进的光线和被反射回来的光线交会时，如果两条光线的相位不一致，就会彼此发生干涉抵消，只有那些相位一致的光线才会继续在光纤中传导。

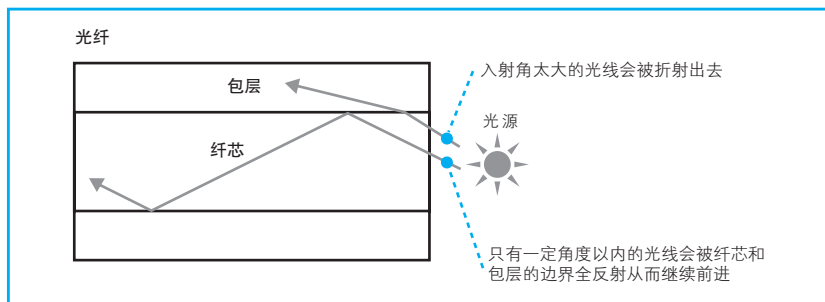


图 4.11 光信号的传导

这个现象和往水面上投一颗石子产生的波纹是一样的。水波也有相位，在石子进入水面的瞬间，波纹中心会产生各种相位的波。不过，相位不同的波会相互干涉，图 4.12 中相位相反的情况是最容易理解的。相位不同的波在干涉后会变弱、消失，最后就只剩下相位相同的波向周围扩散开来。石子投入水面后扩散出来的波纹会形成同心圆状，一般大家对这样的现象已经习以为常，实际上只有相位相同的波才会扩散出来被我们看到。

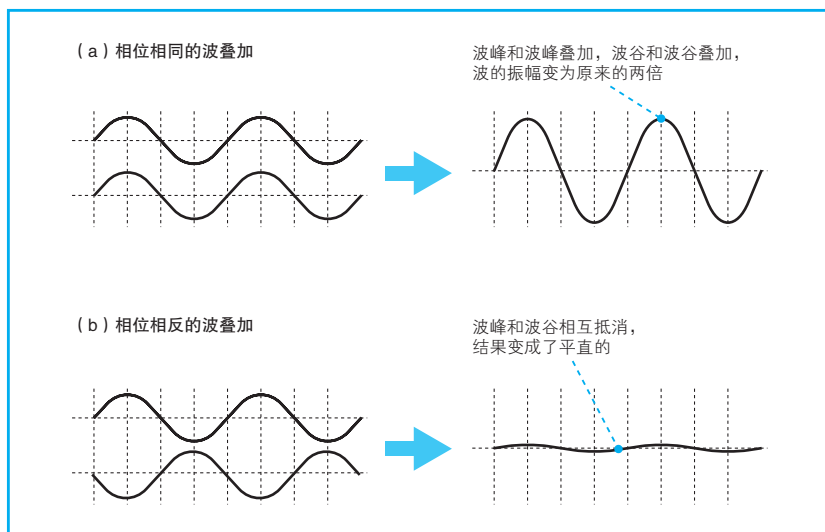


图 4.12 相位不同的波会干涉抵消

如果周围没有障碍物，水面上的波纹会一直呈同心圆状扩散出去，但如果遇到两侧的墙壁，波纹就会被反射回来。这时，向墙壁前进的波和从墙壁反射回来的波就会相互叠加，其中相位相同的波相互加强，相位不同的波相互抵消。

光纤中的情况也是一样的，只不过和水波不同的是，光在被纤芯和包层的边界反射时，相位会发生变化。这个变化的量随光在反射面的反射角度不同而不同，大多数角度下，都会因为相位不同而被干涉抵消。不过，有几个特定的角度下，向反射面前进的光和反射回来的光的相位是一致的，只有以这些角度反射的光才能继续向前传导（图 4.13）。进入光纤的光线有各种角度，但其中，只有少数按照特定角度入射以保持相位一致的光线才会继续传导。

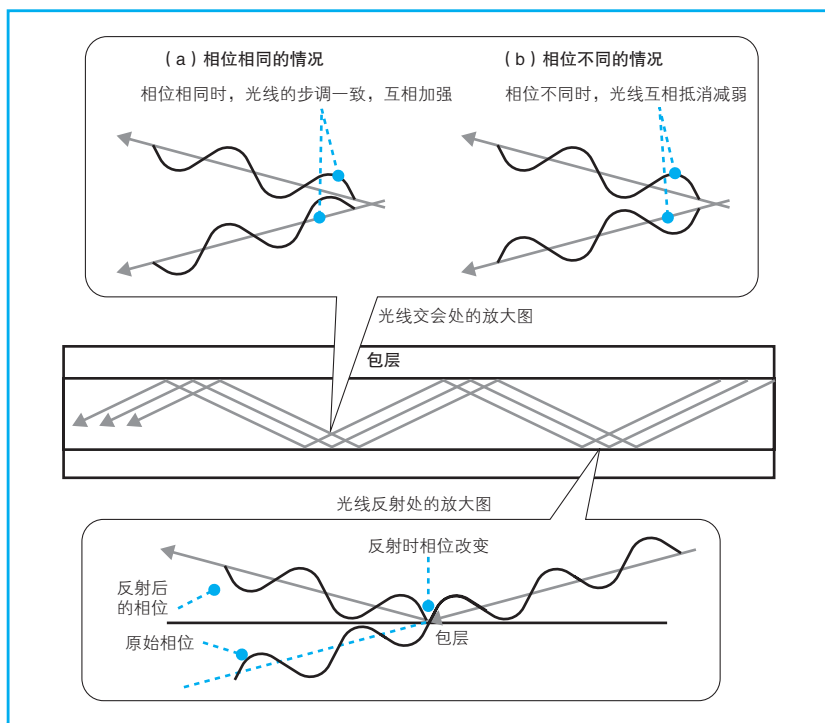


图 4.13 波的反射与相位变化

这个角度非常关键，纤芯的直径也是根据这个角度来确定的，而且纤芯的直径大小会极大地改变光纤的性质。根据纤芯直径，光纤可以划分成几种类型，大体上包括较细的单模光纤($8 \sim 10 \mu\text{m}$)和较粗的多模光纤($50 \mu\text{m}$ 或 $62.5 \mu\text{m}$)。单模光纤的纤芯很细，只有入射角很小的光线才能进入，因此在能够保持相位一致的角度中，只有角度最小的光线能进入光纤。反过来可以说，单模光纤的纤芯直径就是按照只允许相位一致的最小角度的光进入而设计的。多模光纤的纤芯比较粗，入射角比较大的光也可以进入，这样一来，在相位一致的角度中，不仅角度最小的可以在光纤中传导，其他角度更大一些的也可以，也就是说，可以有多条光线在纤芯中同时传导。换句话说，单模和多模实际上表示相位一致的角度有一个还是多个(图 4.14)。

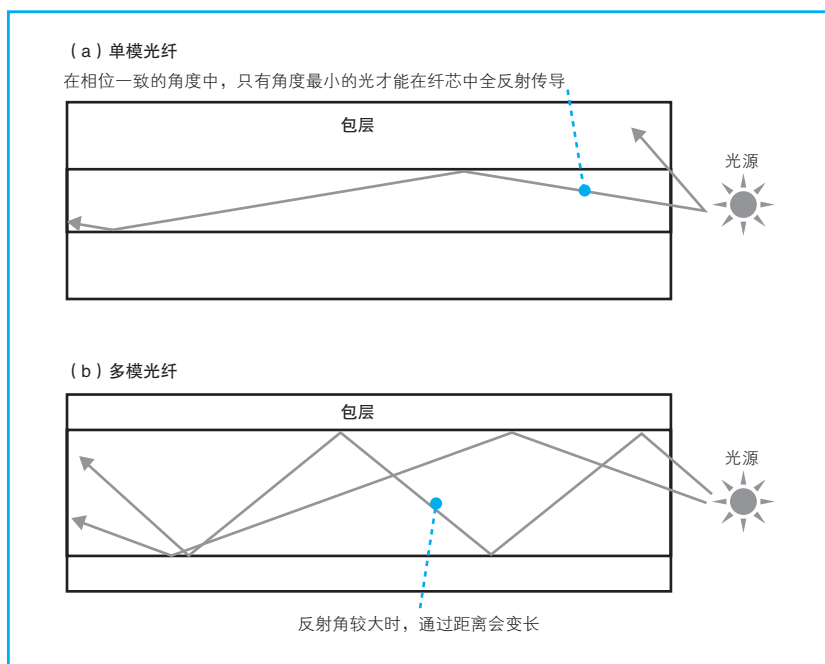


图 4.14 单模光纤与多模光纤

单模光纤和多模光纤在光的传导方式上有所不同，这决定了它们的特性也有所不同。多模光纤中可以传导多条光线，这意味着能通过的光线较多，对光源和光敏元件的性能要求也就较低，从而可以降低光源和光敏元件的价格。相对地，单模光纤的纤芯中只能传导一条光线，能通过的光线较少，相应地对于光源和光敏元件的性能要求就较高，但信号的失真会比较小。

信号失真与光在纤芯传导时反射的次数相关。多模光纤中，多条反射角不同的光线同时传导，其中反射角越大的光线反射次数越多，走过的距离也就越长；相对地，反射角越小的光线走过的距离越短。光通过的距离会影响其到达接收端的时间，也就是说，通过的距离越长，到达接收端的时间越长。结果，多条光线到达的时间不同，信号的宽度就会被拉伸，这就造成了失真。因此，光纤越长，失真越大，当超过允许范围时，通信就会出错（图 4.15）。

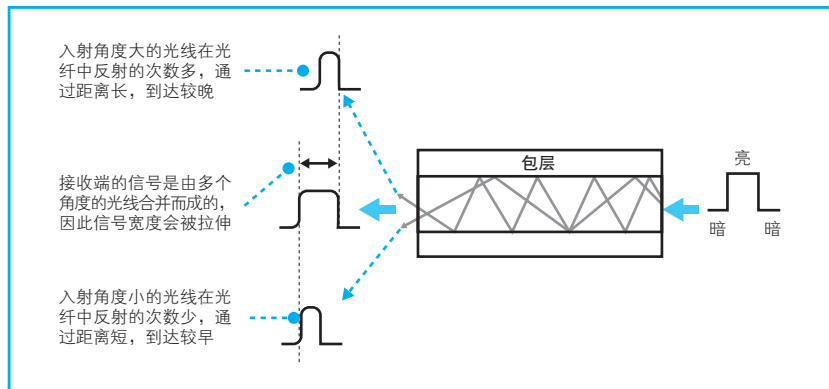


图 4.15 波形失真

相对地，单模光纤则不会出现这样的问题。因为在纤芯传导的光线只有一条，不会因为行进距离的差异产生时间差，所以即便光纤很长，也不会产生严重的失真。

光纤的最大长度也是由上述性质决定的。单模光纤的失真小，可以比

多模光纤更长，因此多模光纤主要用于一座建筑物里面的连接，单模光纤则用于距离较远的建筑物之间的连接。FTTH 属于后者，因此主要使用单模光纤。



4.2.3 通过光纤分路来降低成本

用光纤来代替 ADSL 将用户端接入路由器和运营商的 BAS 连接起来的接入方式就是 FTTH^①，从形态上可大致分为两种。

一种是用一根光纤直接从用户端连接到最近的电话局(图 4.16(a))。这种类型的 FTTH 中，用户和电话局之间通过光纤直接连接，网络包的传输方式如下。首先，用户端的光纤收发器^②将以太网的电信号转换成光信号。这一步只进行电信号到光信号的转换，而不会像 ADSL 一样还需要将包拆分成信元，大家可以认为是将以太网包原原本本地转换成了光信号。接下来，光信号通过连接到光纤收发器的光纤直接到达 BAS 前面的多路光纤收发器。FTTH 一般使用单模光纤，因此其纤芯中只有特定角度的光信号能够反射并前进。然后，多路光纤收发器将光信号转换成电信号，BAS 的端口接收之后，将包转发到互联网内部。

把网络包发送到互联网之后，服务器会收到响应，响应包的光信号也是沿着同一条光纤传输到用户端的。这里，前往互联网的上行光信号和前往用户的下行光信号在光纤中混合在一起，信号会变得无法识别，因此我们需要对它们进行区分，办法是上行和下行信号采用不同波长的光。波长不同的光混合后可通过棱镜原理进行分离，因此光纤中的上行和下行信号即便混合起来也可以识别。像这样在一条光纤中使用不同的波长传输多个光信号的方式叫作波分复用。

另一种光纤的接入方式是在用户附近的电线杆上安装一个名为分光器

① FTTH 和 ADSL 一样也有不同的衍生规格，主流规格是和 ADSL 一样采用 PPPoE 方式进行接入，后面我们的介绍也是基于 PPPoE 方式。

② 将以太网的电信号转换成光信号的设备，也叫“终端盒”。