

## 第7章 传输介质

在第3章到第6章，我们讨论了许多与物理层相关的问题。本章讨论传输介质。我们肯定需要传输介质从源端到目的端传输信号。介质可以有线或者无线。

本章分为三个部分：

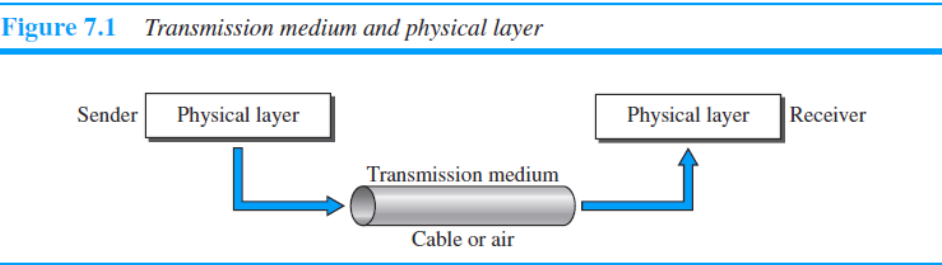
□ 第1节介绍传输介质并定义了它在 Internet 模型中的位置。我们可以将传输介质分为两大类：有向和无向介质。

□ 第2节讨论有向介质。第一部分描述双绞线以及其特性和应用。第二部分描述同轴电缆以及其特性和应用。最后第三部分描述光纤以及其特性和应用。

□ 第3节讨论无向介质。第一部分描述射频以及其特性和应用。第二部分描述微波以及其特性和应用。最后第三部分描述红外线以及其特性和应用。

7.1 引言

传输介质实际上位于物理层以下并直接由物理层控制。可以说，传输介质属于第 0 层。  
图 7-1 说明了传输介质相对于物理层的位置关系。



原书 186 页 图中的英文词对照标记

Sender 发送者

Receiver 接收者

Physical layer 物理层

Transmission medium 传输介质

Cable or air 电缆或空气

图 7-1 传输介质与物理层

**传输介质**（transmission medium）可广义地定义为能从源端传送信息到目的端的任何东西。例如，用餐的二个人交谈时，传输介质是空气；空气也能用烟信号或旗语传递信息。对于一封书信，传输介质可能邮递员、卡车和飞机。

在数据通信中，信息和传输介质的定义更加特定。传输介质通常是自由的空间、金属的电缆或光纤。信息通常是一种信号，是来自另一种形式的数据转换的结果。

利用电信号进行长途通信开始于 19 世纪，Morse 发明的电报，电报通信的速度很慢并依赖于金属的电缆。

当电话在 1869 年被发明的时候，人类声音的通信成为了可能。那时电话通信需要一种金属的介质将人类声音的转变换成信号进行传送。然而，由于电线的质量不佳，通信是不可靠的。线路时常有噪声，并且技术也很简单的。

当赫兹(Hertz)能够发送高频信号时，1895 年开始有了无线通信。稍后，马可尼(Marconi)设计了一个能跨越大西洋传输电报类型信息的方法。

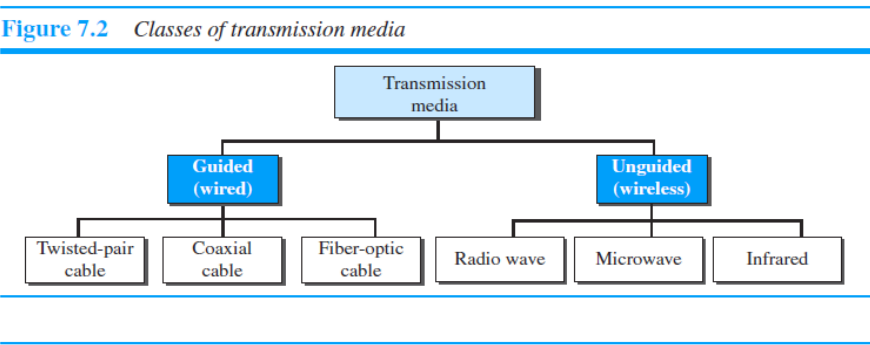
我们已经经历了很长的路（现在已取得了很大进展），已发明了较好的金属介质（例如，

双绞线和同轴电缆)。光纤的使用令人难以置信地增加了数据速率，自由空间（空气、真空和水）被更有效地利用，有一部分适用的技术(如调制和多路复用)已前面章节中讨论。

正如第 3 章所述，计算机和其他电信设备用信号表示数据。这些信号以电磁能的形式在设备之间通过传输介质传播。

电磁能是电场和磁场相互振荡的组合形式，它包括电力、无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、伽马射线和宇宙射线。每一种都对应于电磁频谱 (electromagnetic spectrum) 的一部分。但是目前，并非所有频谱都可用于电子通信。这些可利用频谱的介质也只限于有限的几类。

按照电信中的用途，传输介质可以分为两大类：有向的和无向的。有向介质包括双绞线、同轴电缆和光缆，无向介质通常是空气。图 7-2 说明了分类系统。



原书 187 页 图中的英文词对照标记

- Transmission media 传输介质
- Guided (wired) 有向的 (有线的)
- Unguided (wireless) 无向的 (无线)
- Twisted-pair cable 双绞线
- Coaxial cable 同轴电缆
- Fiber-optic cable 光纤电缆
- Radio wave 射频电波
- Microwave 微波
- Infrared 红外线

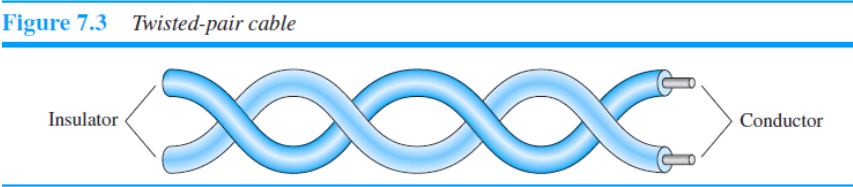
图 7-2 传输介质分类

7.2 导向介质

导向介质(guided media)是指那些在设备之间提供通路的介质,包括**双绞线**(twisted-pair cable)、**同轴电缆**(coaxial cable)和**光缆**(fiber-optic cable)。沿着这类介质传输的信号,其传输方向和传播范围受介质的物理边界限制。双绞线和同轴电缆使用金属(铜)导体接收和传输电流形式的信号。**光纤**(optical fiber)是一种玻璃线缆,接收和传输光波形式的信号。

7.2.1 双绞线

双绞线由两根导线(通常是铜线)构成,其中的每一根导线都有自己的塑料绝缘层,两者绞在一起,如图 7-3 所示。



原书 187 页 图中的英文词对照标记

Insulator 绝缘层

Conductor 导体

图 7-3 双绞线

线路中的一条用于将信号传送到接收方,另一条仅用作接地参考点。接收方使用两条线路的电平之间的差值。

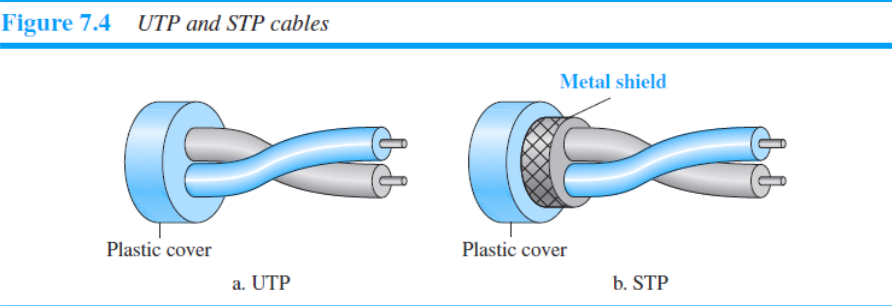
除了发送方在线路上发送的信号之外,干扰(噪声)和串扰也可能会影响两条线路并产生有害的信号。

如果两条导线是平行的,这些有害信号的影响在两条线路中就会不同,因为它们相对于噪声或者串扰所处的位置是不同的(例如,一条较近而另一条较远)。这会在接收方产生差值。通过将两条线绞合在一起,可以保持平衡。例如,假定在一个绞合段,一条导线距噪声源较近而另一条导线距噪声源较远,而在下一个绞合段,情况刚好相反。绞合可以使两条线路同等地受到外部影响(噪声或者串扰)。这意味着,接收方不会通过计算两者之间的差值接收到有害信号。从上面的讨论中可以很明显地看出,单位长度(例如,英寸)的绞合数决

定了电缆的质量，绞合数越多意味着质量更高。

非屏蔽双绞线与屏蔽双绞线

通信中使用的最常见的双绞线是指**非屏蔽双绞线**（unshielded twisted-pair，UTP）。IBM 还生产了一种自己使用的双绞线类型，称为**屏蔽双绞线**（shielded twisted-pair，STP）。STP 电缆有一层金属薄片或者织成网状的包覆材料将每一对带有绝缘层的导体包围起来。尽管金属包装层可以通过防止噪声或者串扰而提高电缆的质量，但是它更加笨重和昂贵。图 7-4 说明了 UTP 和 STP 之间的差别。我们讨论的中心主要是 UTP，因为 STP 除了 IBM 以外很少使用。



原书 188 页 图中的英文词对照标记

Plastic cover 塑料覆盖层  
Metal shield 金属屏蔽

图 7-4 UTP 和 STP 电缆

分类

电子工业协会（Electronic Industries Association，EIA）已经制定了一个将非屏蔽双绞线分为七类的标准。分类由电缆的质量确定，第 1 类是最低的，第 7 类是最高的。每一种 EIA 分类适用于特定的用途。表 7-1 说明了这些分类。

**Table 7.1** *Categories of unshielded twisted-pair cables*

Category	Specification	Data Rate (Mbps)	Use
1	Unshielded twisted-pair used in telephone	< 0.1	Telephone
2	Unshielded twisted-pair originally used in T lines	2	T-1 lines
3	Improved CAT 2 used in LANs	10	LANs
4	Improved CAT 3 used in Token Ring networks	20	LANs
5	Cable wire is normally 24 AWG with a jacket and outside sheath	100	LANs

Category	Specification	Data Rate (Mbps)	Use
5E	An extension to category 5 that includes extra features to minimize the crosstalk and electromagnetic interference	125	LANs
6	A new category with matched components coming from the same manufacturer. The cable must be tested at a 200-Mbps data rate.	200	LANs
7	Sometimes called <i>SSTP (shielded screen twisted-pair)</i> . Each pair is individually wrapped in a helical metallic foil followed by a metallic foil shield in addition to the outside sheath. The shield decreases the effect of crosstalk and increases the data rate.	600	LANs

原书 188-189 页 表中的英文词对照标记

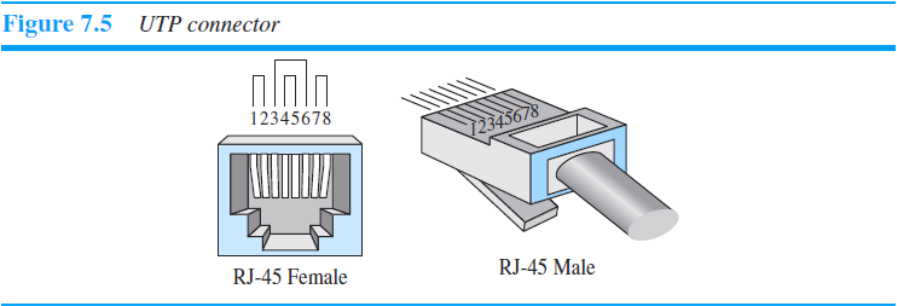
**表 7-1** 非屏蔽双绞线的分类

分类	说 明	数据速率 (Mbps)	用途
1	电话中所用的非屏蔽双绞线	<0.1	电话
2	本来用于 T-线路的非屏蔽双绞线	2	T-1 线路
3	改进的 CAT2，用于局域网	10	局域网
4	改进的 CAT3，用于令牌环网	20	局域网
5	电缆线通常带有一个盒子和外面护层的 24AWG	100	局域网
5E	5 类线的扩充包括最小串扰和抗电磁干扰的额外特性	125	局域网
6	数据速率通过 200Mbps 测试的一种新的电缆线	200	局域网
7	有时又称为 SSTP（屏蔽网屏双绞线），每对双绞线独立地封装在螺旋状的一个	600	局域网

	金属薄模接着一个金属薄模的箔中，在外部再加封套。屏蔽减少串扰和增加数据率		
--	--------------------------------------	--	--

连接器

最常用的 UTP 连接器是 RJ45（RJ 表示注册插头），如图 7-5 所示。RJ45 是一种有插槽的连接器，表示只能以一个方向插入。



原书 189 页 图中的英文词对照标记

Female 母插头

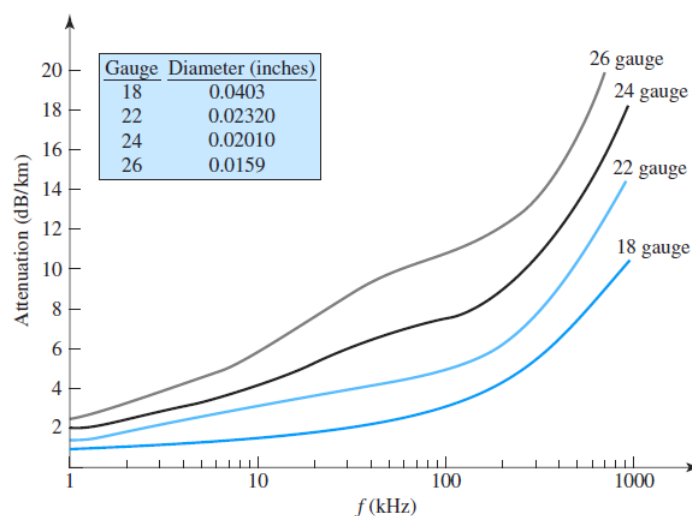
Male 公插头

图 7-5 UTP 连接器

性能

测试双绞线性能的一种方法是对比频率和距离的衰减曲线。双绞线允许通过的频率范围比较宽。但是，图 7-6 说明随着频率的升高，以每英里的分贝数进行测量，在频率超过 100kHz 时，衰减数值会突然升高。注意：规格（gauge）是电线粗细的标准计量单位。

Figure 7.6 UTP performance



原书 190 页 图中的英文词对照标记

Gauge 规格

Diameter (inches) 直径(英寸)

Attenuation 衰减

图 7-6 UTP 的性能

## 应用

双绞线用于电话线路，提供语音和数据的通道。本地环路，即连接用户到中心电话机房的线路，最常用的是非屏蔽双绞线。第 14 章讨论电话网络。

电话公司使用 DSL 线路提供高数据速率连接，这种线路也使用具有高带宽容量的非屏蔽双绞线。第 14 章讨论 DSL 技术。

局域网，如 10Base-T 和 100Base-T，也使用双绞线。第 13 章讨论这些网络。

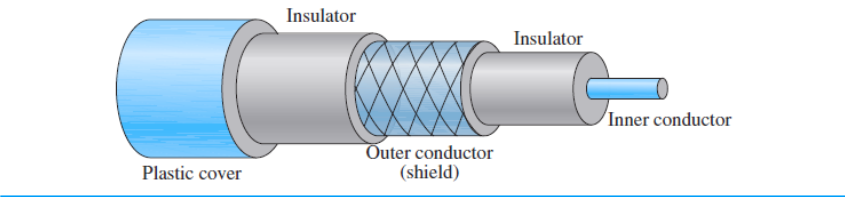
### 7.2.2 同轴电缆

同轴电缆（或者称为同轴）与双绞线相比，可以传输更高频率范围的信号，部分原因是这两种介质的构造有很大的不同。同轴电缆不使用两根电线，而是使用一根位于中央的实心或者多股绞合的核心金属丝导体（通常是铜的），导体封装在绝缘护套中，然后再把它封装在金属箔、金属网或者两者的组合成的外部导体中。外部金属包装既可以屏蔽噪声，又可以作为第二导体，构成回路。外部导体的外面再由绝缘护套封装，最后整条电缆由一层塑料外



套保护（见图 7-7）。

Figure 7.7 Coaxial cable



原书 190 页 图中的英文词对照标记

Plastic cover 塑料覆盖层

Insulator 绝缘层

Outer conductor (shield) 外导体(屏蔽)

Inner conductor 内导体

图 7-7 同轴电缆

同轴电缆标准

同轴电缆是按照无线电管理（radio government，RG）等级进行分类的。每一个 RG 号表示单独的一组物理规范，包括内部导体的电线规格、内部绝缘体的粗细和类型、屏蔽层的结构以及外部封套的尺寸和类型。RG 等级定义的每一种电缆适用于特定的功能，如表 7-2 所示。

Table 7.2 Categories of coaxial cables

Category	Impedance	Use
RG-59	75 Ω	Cable TV
RG-58	50 Ω	Thin Ethernet
RG-11	50 Ω	Thick Ethernet

原书 191 页 表中的英文词对照标记

表 7-2 同轴电缆分类

Category 种类

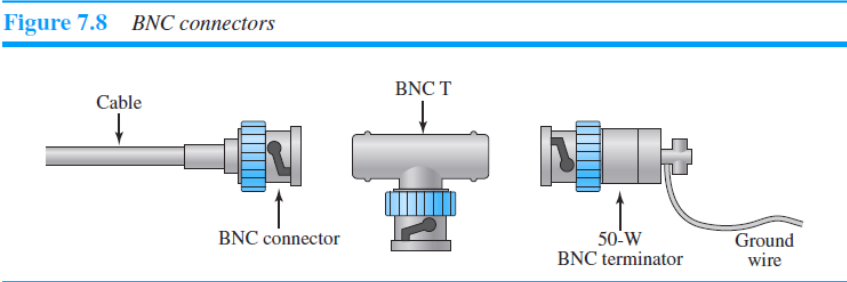
Impedance 阻抗

Use 用途

同轴电缆连接器

为了将同轴电缆和设备相连，需要使用同轴电缆连接器。目前最常见的连接器类型是 **BNC (Bayonet-Neil-Concelman)** 连接器。图 7-8 表示了这些连接器中三种常用的类型：BNC 连接器，BNC T 型连接器和 BNC 终接器。

BNC 连接器用于将电缆的一端连接到设备如电视机上。BNC T 型连接器用于以太网（见第 13 章），从主线路引出分支以连接计算机或其他设备。BNC 终接器用于电缆的末端以防止信号反射。



原书 191 页 图中的英文词对照标记

Cable 电缆

BNC connector BNC 连接器

BNC terminator BNC 终接器

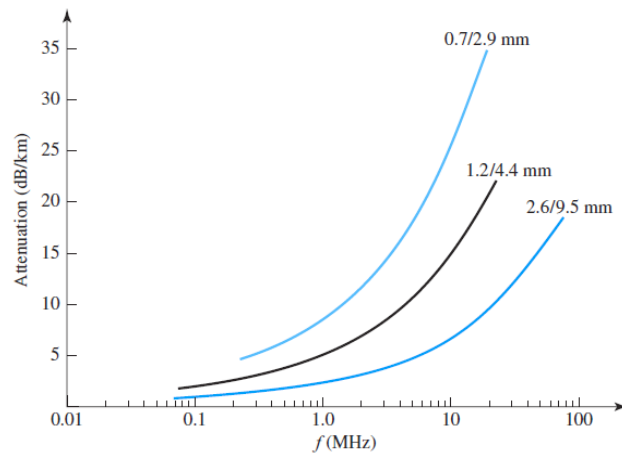
Ground wire 地线

图 7-8 BNC 连接器

性能

同双绞线一样，我们也能测试同轴电缆的性能。从图 7-9 中可以看出，同轴电缆的衰减要高于双绞线。换句话说，尽管同轴电缆有更高的带宽，但是信号减弱很快因而经常需要使用中继器。

Figure 7.9 Coaxial cable performance



原书 192 页 图中的英文词对照标记

Attenuation 衰减

图 7-9 同轴电缆性能

## 应用

同轴电缆最初是在模拟电话网络中使用的，单个的同轴电缆网络能够传送 10000 路语音信号。后来将它用于数字电话网络中，单个的同轴电缆能够以高达 600Mbps 的速率传送数据。但是，电话网络中的同轴电缆目前大部分已经被光缆取代了。

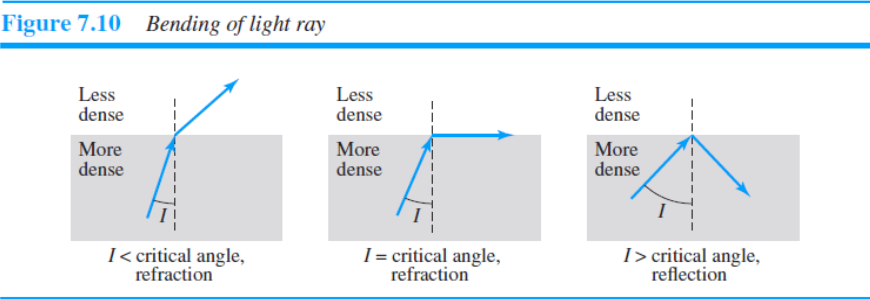
有线电视网络（见第 14 章）也使用同轴电缆。在传统的有线电视网络中，整个网络都使用同轴电缆。但是，后来有线电视提供商用光缆取代了网络中的大部分的同轴电缆，混合网络只是在网络边界、靠近消费者房屋的地方使用同轴电缆。有线电视使用 RG-59 同轴电缆。

另一种常见的应用是在传统的以太网中（见第 13 章）。由于它的带宽高以及由此产生的高速率，因此在早期的以太网中选用同轴电缆进行数字传输。10Base-2 或者细缆以太网，使用 RG-58 同轴电缆和 BNC 连接器以 10Mbps 的速率传输数据，传输距离是 185m。10Base5 或者粗缆以太网，使用 RG-11（粗同轴电缆）以 10Mbps 的速率传输数据，传输距离是 5000m。粗缆以太网有专用的连接器。

7.2.3 光缆

光缆由玻璃或者塑料构成，能够传输光信号。为了理解光纤，首先需要研究光的几个本质特性。

光在通过单一物质时，是沿直线传播的。如果光线从一种物质突然进入另一种物质（密度更高或者更低），则会改变方向。图 7-10 说明了光线从高密度物质进入低密度物质时是如何改变方向的。



原书 193 页 图中的英文词对照标记

More dense 高密度

Less dense 低密度

Critical angle 临界角

Refraction 折射

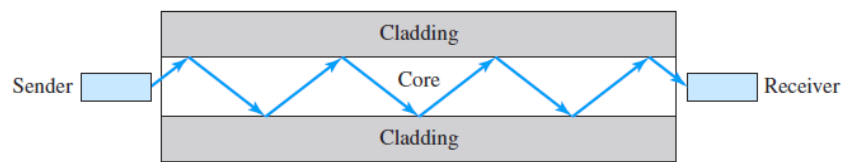
Reflection 反射

图 7-10 光线的折射

如图中所示，如果**入射角**（angle of incidence）（入射光线与界面上入射点法线的夹角）小于**临界角**（critical angle），光线会沿着较接近于表面的方向发生**折射**（refract）；如果入射角等于临界角，光线则会沿着表面弯曲；如果入射角大于临界角，光线则会**反射**（reflect，发生转向）并再次在高密度物质中传输。注意，临界角是物质的一种特性，不同物质的临界角的值是不同的。

光纤使用反射来引导光通过通道。玻璃芯或塑料**芯**外面环绕着低密度的玻璃的或塑料的**包层**（cladding）。两种材料的密度差值必须达到如下条件，即通过纤芯传播的一束光必须完全被包层反射，而不发生折射。见图 7-11。

Figure 7.11 Optical fiber



原书 193 页 图中的英文词对照标记

Sender 发送者

Receiver 接收者

Cladding 包层

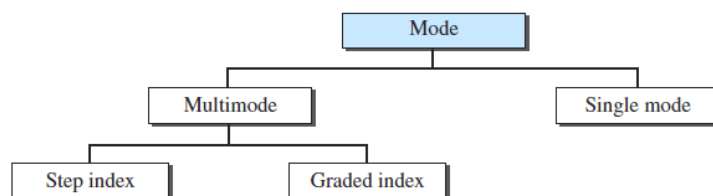
Core 核心

图 7-11 光纤

### 传播模式

目前的技术支持两种模式（多模和单模），通过这两种模式光线沿着光通道传播，每一种模式需要光纤具有不同的物理特性。多模传输有两种实现形式：阶跃折射率模式和渐变折射率模式（见图 7-12）。

Figure 7.12 Propagation modes



原书 193 页 图中的英文词对照标记

Mode 模式

Multimode 多模

Single mode 单模

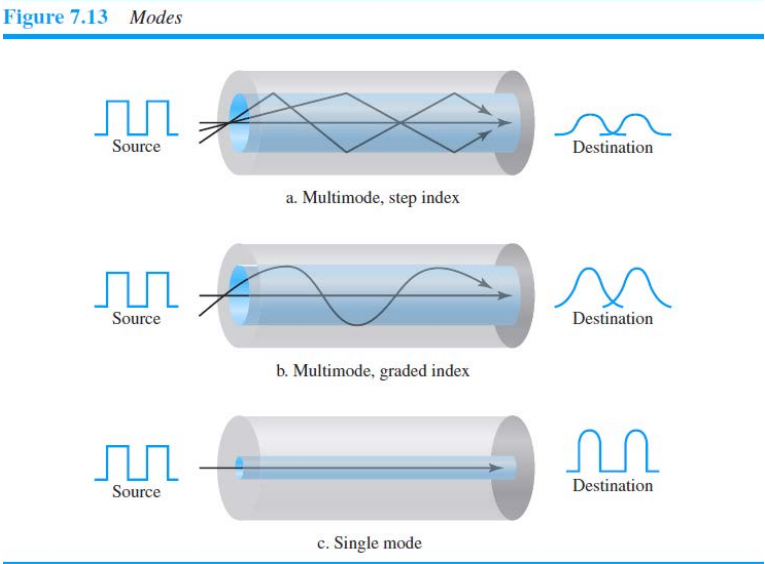
Step index 阶跃折射率模式

Graded index 渐变折射率模式

图 7-12 传播模式

多模

之所以叫做多模，是因为来自光源的多个光束沿着不同的路径通过纤芯。这些光束如何在光缆内部通过取决于纤芯的结构，如图 7-13 所示。



原书 194 页 图中的英文词对照标记

Source 源

Destination 目的

Multimode, step index 多模，阶跃折射率

Multimode, graded index 多模，渐变折射率

Single mode 单模

图 7-13 模式

在**多模阶跃折射率光纤**（multimode step-index fiber）中，纤芯的密度从中心到边缘保持不变。光束到达纤芯与包层交界处之前，以直线的形式通过等密度的纤芯。在交界处，突然遇到低密度的包层会引起光束传输角度的变化。阶跃折射率（step index）这个术语是指这种变化的突然性。

第二种类型的光纤，称为**多模渐变折射率光纤**（multimode graded-index fiber），通过这种光缆的信号可以减少失真。指数（index）这个词是指折射率。正如上面所看到的，折射

率与密度有关。所以，渐变折射率光纤是一种具有不同密度的光纤。密度在纤芯的中心处最高，从中心到边缘逐渐降低，在边缘处最低。图 7-13 说明了密度的变化对光束传播的影响。

单模

单模使用阶跃折射率光纤并且使用聚焦效果更好的光源，这样可以把光束限制在更小的角度范围内，几乎接近于水平。**单模光纤**（single-mode fiber）在生产时使用直径比多模光纤要小得多且密度（折射率）非常低的光纤维。密度的降低使临界角几乎接近 90°垂直。这种情况下，不同光束的传播几乎相同，延迟几乎可以忽略。所有光束同时到达终点并重新组合成信号（图 7-13）。

光纤规格

光纤是通过纤芯的直径与光纤包层的直径的比率定义的，两者都用微米（mm）表示。常见规格如表 7-3 所示。注意：最后一行列出的规格仅用于单模光纤。

Table 7.3 Fiber types

Type	Core (μm)	Cladding (μm)	Mode
50/125	50.0	125	Multimode, graded index
62.5/125	62.5	125	Multimode, graded index
100/125	100.0	125	Multimode, graded index
7/125	7.0	125	Single mode

原书 195 页 表中的英文词对照标记

表 7-3 光纤类型

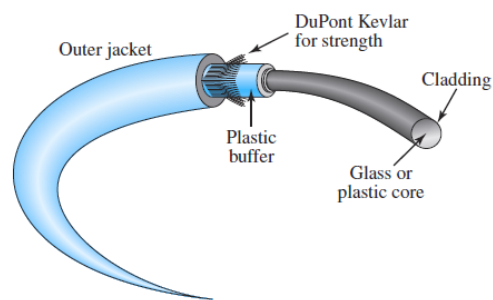
Type	类型
Core (μm)	纤芯(μm)
Cladding (μm)	包层 (μm)
Mode	模式
Multimode, graded index	多模，渐变折射率
Single mode	单模

光缆组成

图 7-14 说明了一种典型光缆的组成。外部封套由 PVC 或者特氟隆制成。封套里面是用于提高光缆强度的 Kevlar 纤维。Kevlar 是一种用于制造防弹背心的强度很高的纤维材料。在 Kevlar 层的下面是另一层塑料薄层用于缓冲光纤的受力。光纤位于光缆的中心，由包层

和纤芯构成。

Figure 7.14 Fiber construction



原书 195 页 图中的英文词对照标记

Outer jacket 外部封套

DuPont Kevlar for strength 提高强度的 DuPont Kevlar

Plastic buffer 塑料缓冲

Cladding 包层

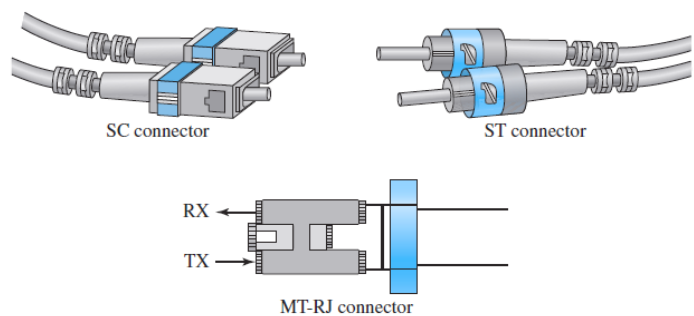
Glass or plastic core 玻璃或塑料纤芯

图 7-14 光纤结构

光缆连接器

光缆使用三种不同类型的连接器，如图 7-15 所示。**用户通道**（subscriber channel，SC）连接器用于有线电视中，它采用推拉式固定方法。**直插式**（straight-tip，ST）连接器用于将光缆连接到网络设备上，它使用卡口式固定方法，比 SC 更可靠。**MT-RJ** 是一种新的连接器，与 RJ45 的规格相同。

Figure 7.15 Fiber-optic cable connectors



原书 196 页 图中的英文词对照标记



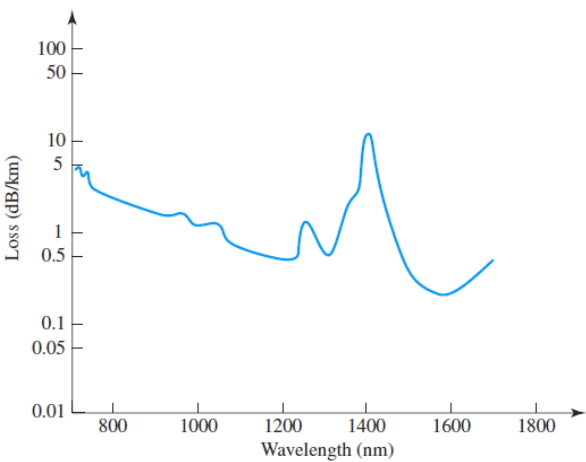
connector 连接器

图 7-15 光缆连接器

性能

在图 7-16 中，衰减相对于波长的变化曲线说明了光缆中的一种非常值得注意的现象，衰减曲线比双绞线和同轴电缆的衰减曲线要平坦。其性能如此之好，以至于在使用光纤时，只需要很少的中继器（实际上少于 1/10）。

Figure 7.16 Optical fiber performance



原书 196 页 图中的英文词对照标记

Loss 损耗

Wavelength 波长

图 7-16 光纤性能

应用

光纤通常用在主干网络中，因为它提供了很高的带宽，所以其性能成本是合算的。目前，对于 WDM，能以 1600Gbps 的速率传输数据。第 17 章讨论的 SONET 就提供了这样的主干网。

一些有线电视公司结合使用光纤和同轴电缆，可以构建混合网络。光纤提供主干结构，

而同轴电缆则提供到用户住所的连接。这是一种性能成本合算的配置方案，因为用户端所需的带宽窄，使用光纤在经济上不合算。

局域网，如 100Base-FX 网（快速以太网）和 1000Base-X 网也使用光缆。

## 光纤的优点和缺点

### 优点

与金属电缆（双绞线或者同轴电缆）相比，光缆具有以下优点：

- **高带宽** 光缆能够支持比双绞线或同轴电缆高得多的带宽（数据速率）。目前，光缆的数据速率和带宽利用所受到的不是介质的限制，而是受到信号生成和接收技术的限制。
- **信号衰减小** 光纤传输距离明显高于其他有向介质。信号在不需要再生的情况下可以传输 50km。对于同轴电缆或者双绞线，每隔 5km 就需要一个中继器。
- **无电磁干扰** 电磁噪声不能影响光缆。
- **抗腐蚀材料** 玻璃比铜抗腐蚀能力更强。
- **重量轻** 光缆比铜缆要轻得多。
- **不易被窃听** 光纤明显比铜缆更不易被窃听。铜缆会形成天线，易于被窃听。

### 缺点

光纤在使用中也有一些缺点：

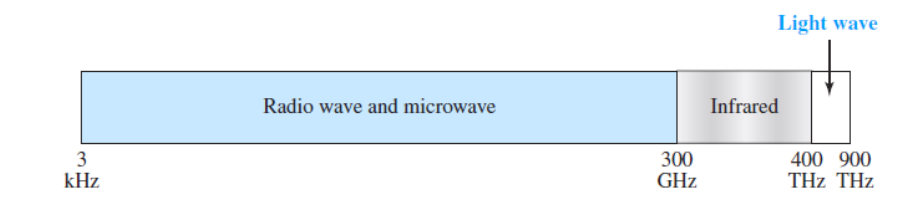
- **安装/维护** 光纤是一种较新的技术。安装和维护需要专门技能，这种技能并不是在任何地方都有的。
- **单向性** 光的传播是单向的。如果需要进行双向通信，则需要两根光纤。
- **成本** 光缆和接口比其他有向介质的昂贵一些。如果对带宽的需求不是很高，通常情况下使用光纤不合算。

## 7.3 非导向介质：无线

**非导向介质**（unguided media）不使用物理导体传输电磁波。这种类型的通信通常是指**无线通信**（wireless communication）。信号通常通过空气广播，能够被任何人接收，只要他拥有一台接收信号的设备。

图 7-17 表示了用于无线通信的部分电磁频谱，范围为 3kHz~900THz。

Figure 7.17 Electromagnetic spectrum for wireless communication



原书 198 页 图中的英文词对照标记

Radio wave and microwave 无线电波和微波

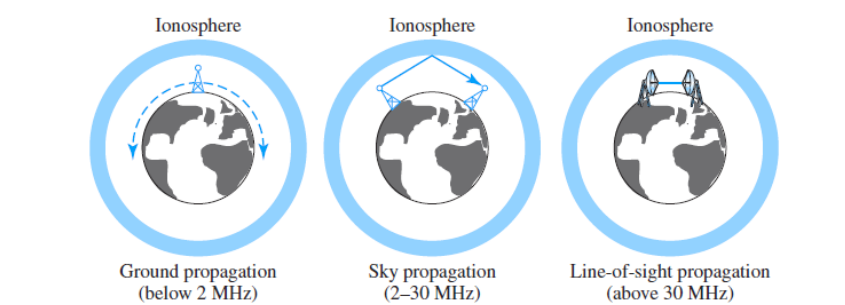
Infrared 红外线

light wave 光波

图 7-17 无线通信使用的电磁频谱

无线信号能通过多种途径从信号源传输到目的地。其方法有地表传播、天空传播和视线传播，如图 7-18 所示。

Figure 7.18 Propagation methods



原书 198 页 图中的英文词对照标记

Ionosphere 电离层

Ground propagation 地表传播

Sky propagation 天空传播

Line-of-sight propagation 视线传播

below 2 MHz 低于 2MHz

above 30 MHz 高于 30MHz

图 7-18 传播方法

在**地表传播**（ground propagation）中，无线电波通过地球的大气层的最低部分紧绕地球传播。这些低频率信号通过发射天线沿着地球表面向各个方向发射。传输距离取决于信号功率的大小，功率越强，传输的距离越远。在**天空传播**（sky propagation）中，较高频率的无线电波向上传播到电离层（大气中的一层，该层中粒子以离子的形式存在），从电离层再反射回地球。这种类型的传输可以使用较低的输出功率，传输更远的距离。在**视线传播**（line-of-sight propagation）中，非常高频率的信号沿着直线直接在天线之间传输。天线必须是有向的、互相正对的，而且必须足够高或距离足够近，以免受地球曲率的影响。视线传播是很难处理的，因为无线电传输不能完全聚焦。

电磁频谱中，定义为无线电波和微波的部分被分成八个区域，称为波段（band），每一个波段都受政府机构的管制。这些波段从甚低频率（very low frequency，VLF）到极高频率（extremely high frequency，EHF）依次排列。表 7-4 列出了这些波段及其频率范围、传播方法和应用。

Table 7.4 Bands

Band	Range	Propagation	Application
very low frequency (VLF)	3–30 kHz	Ground	Long-range radio navigation
low frequency (LF)	30–300 kHz	Ground	Radio beacons and navigational locators

Band	Range	Propagation	Application
middle frequency (MF)	300 kHz–3 MHz	Sky	AM radio
high frequency (HF)	3–30 MHz	Sky	Citizens band (CB), ship/aircraft
very high frequency (VHF)	30–300 MHz	Sky and line-of-sight	VHF TV, FM radio
ultrahigh frequency (UHF)	300 MHz–3 GHz	Line-of-sight	UHF TV, cellular phones, paging, satellite
superhigh frequency (SHF)	3–30 GHz	Line-of-sight	Satellite
extremely high frequency (EHF)	30–300 GHz	Line-of-sight	Radar, satellite

原书 198-199 页 表中的英文词对照标记

表 7-4 波段

波 段	范 围	传 播	应 用
VLF（甚低频）	3～30kHz	地面	远程无线电导航
LF（低频）	30～300kHz	地面	无线电导航台和导航定位器

MF（中频）	300~3MHz	天空	AM 广播
HF（高频）	3~30MHz	天空	民用波段（CB）和航海/航空通信
VHF（甚高频）	30~300MHz	天空和视线	VHF 电视波段和 FM 广播
UHF（超高频）	300~3GHz	视线	UHF 电视波段，移动电话，寻呼，卫星
SHF（特高频）	3~30GHz	视线	卫星通信
EHF（极高频）	30~300GHz	视线	雷达和卫星

可以把无线传输分为三大组：无线电波、微波和红外波。

### 7.3.1 无线电波

尽管无线电波和微波之间没有明确的界限，但是通常将频率范围在 3~1GHz 之间的电磁波称为无线电波（radio wave），频率范围在 1~300GHz 的电磁波称为微波（microwave）。但是，我们使用波的特性而不是频率的特性作为分类的标准。

大部分无线电波是全方向的。在天线发射无线电波时，它们会向各个方向传播。这意味着发射天线和接收天线不必对准。发射天线发射的无线电波，可以被任何接收天线接收。全方向特性也有一个缺点：一只天线发射的无线电波，容易受到另一只使用相同频率或波段的的天线所发射的信号干扰。

无线电波，尤其是那些以天空模式传播的电波，可以传输很长的距离。这使得无线电波成为诸如 AM 广播等远距离广播的优选。

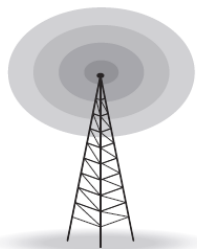
无线电波，特别是那些低、中频率的电波，可以穿透墙体。这种特性既有优点也有缺点。说它有优点，是因为如 AM 收音机可以在建筑物内接收信号。说它有缺点，是因为不能隔离建筑物内部和外部的通信。无线电波的波段与微波相比较窄，仅在 1 GHz 以下。当这一波段被划分为多个子波段时，子频带也很窄，导致在数据通信中数据速率很低。

几乎整个波段都受政府机构（比如，在美国是 FCC）的管制。使用波段的任何部分必须得到这些机构的许可。

### 全向天线

无线电波使用**全向天线**（omnidirectional antennas）向所有方向发送信号。根据波长、强度和传输目的的不同，可以有多种类型的天线。图 7-19 说明了一种全向天线。

Figure 7.19 Omnidirectional antenna



原书 200 页 图中的英文词对照标记

图 7-19 全向天线

## 应用

无线电波的全向特性使得它对多播很有用,在多播过程中,有一个发送方和多个接收方。

AM 和 FM 收音机、电视、航海无线电、无绳电话和寻呼机都是多播的例子。

Radio waves are used for multicast communications,  
such as radio and television, and paging systems.

无线电波用于多播通信,如收音机、电视以及寻呼系统。

## 7.3.2 微波

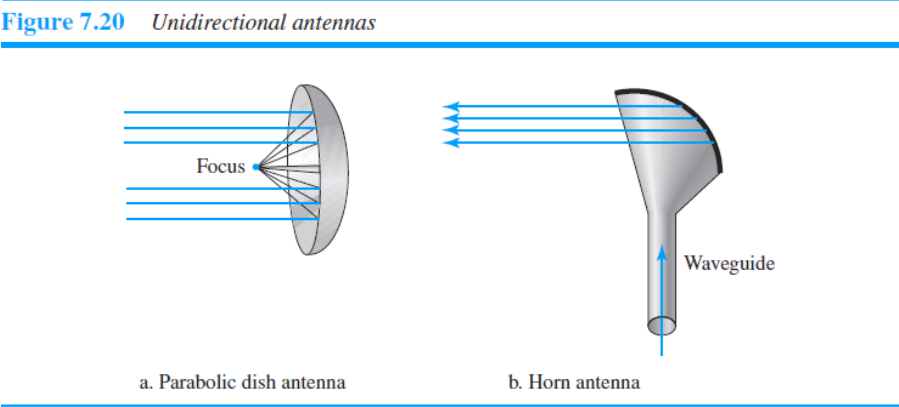
频率范围为  $1\sim 300\text{GHz}$  的电磁波称为微波。

微波是单向的。在天线发射微波时,它们可以聚集在很窄的范围内。这意味着发射天线和接收天线需要对准。单向特性具有一个很明显的优势,即一对对准的天线不受另一对对准天线的干扰。

- 微波传播属于视线传播。安装天线的塔必须相互可见。如果相距很远,天线塔就必须很高。地球的曲率和其他障碍物不允许两座很低的天线塔使用微波进行通信。长距离通信时,通常需要中继站。
- 甚高频微波不能穿透墙体。在接收机位于建筑物内部时,这种特性是一种缺点。
- 微波波段相对较宽,接近于  $299\text{GHz}$ 。所以,它能够分配更高带宽的子波段,而且可以获得更高的数据速率。
- 要使用波段中的某个部分,就必须得到政府机构的许可。

## 单向天线

微波需要**单向天线**（unidirectional antennas）在一个方向发射信号。微波通信使用两种类型的天线：抛物面碟形天线和喇叭天线（见图 7-20）。



原书 201 页 图中的英文词对照标记

Focus 焦点

Waveguide 波导

Parabolic dish antenna 抛物面碟形天线

Horn antenna 喇叭天线

图 7-20 单向天线

**抛物面碟形天线**（parabolic dish antenna）基于抛物面的几何形状：平行于对称线的每条光线（视线）在曲面上以不同角度反射回来，以使所有的光线相交于一个公共点，这个点称为焦点。抛物面碟形天线的工作原理如同一个漏斗，接收到较宽范围的微波后，将它们导向到一个公共点。与使用单点接收机相比，通过这种方式可以恢复更多的信号。

外发的传输是通过对准抛物面碟形天线的喇叭天线广播出去的。微波遇到抛物面碟形天线时，会以与接收路径相反的方向偏转出去。

**喇叭天线**（horn antenna）看起来像一个巨大的勺子。外发的传输沿着主干（像一个柄）广播，通过弯曲的头部以一系列范围较窄的平行波束的形式偏转出去。接收到的传输由勺形的喇叭天线采用与抛物面碟形天线类似的方式汇聚起来，偏转入主干中。

应用

由于微波具有单向性，因而在发送方和接收方之间需要单播（一对一）通信时非常有用。微波应用于移动电话（第 16 章）、卫星网络（第 16 章）和无线局域网（第 15 章）。

**Microwaves are used for unicast communication such as cellular telephones, satellite networks, and wireless LANs.**

微波用于单播通信，如移动电话、卫星网络和无线局域网。

### 7.3.3 红外线

红外线（infrared waves）的频率范围为 300GHz~400THz（波长为 1mm~770nm），可以用于短距离通信。红外信号的频率很高，不能穿透墙体。这种优点可以防止系统之间相互干扰，在一个房间内的短距离通信不会受到相邻房间的另一个系统的影响。在使用红外遥控器时，不会干扰邻居红外遥控器的使用。但是，这种特性也使得红外信号无法进行长距离通信。另外，在建筑物外面不能使用红外波，因为太阳射线中包含可能干扰通信的红外波。

#### 应用

红外波段，接近于 400THz，对数据传输有非常大的潜力。这样一种高带宽能以高数据速率传输数字数据。红外数据联盟（Infrared Data Association, IrDA）负责红外波的使用。为了使用这些信号用于设备（如键盘、鼠标、个人计算机和打印机等）之间的通信，该联盟已经建立了一些相应的标准。例如，一些生产商提供一种特殊的接口称为 **IrDA 接口**，支持无线键盘与 PC 的通信。该标准最初确定最大传输距离为 8 m 时的数据速率是 75kbps，最新标准确定的数据速率是 4Mbps。

IrDA 确定的红外信号通过视线传播，键盘上的红外接口需要指向 PC 才能进行传输。

**Infrared signals can be used for short-range communication in a closed area using line-of-sight propagation**

红外信号可以在封闭区域用于短距离通信，使用视线传播。



## 7.4 本章结束资料

### 7.4.1 推荐读物

为了深入讨论与本章有关的主题，推荐下列读物，在本书末列出括号[……]中的参考资料。

#### 书籍

在[GW04]，[Sta04]和[Tan03]中讨论了传输介质。[SSS05]给出传输介质完整讨论。

### 7.4.2 关键术语

Angle of incidence	入射角	omnidirectional antenna	全向天线
Bayonet Neill-Concelman (BNC)	BNC 头	optical fiber	光纤
Cladding	包层	parabolic dish antenna	抛物面碟形天线
coaxial cable	同轴电缆	Radio Government (RG) rating	无线电管理等级
core	核心	radio wave	无线电波
critical angle	临界角	reflection	反射
electromagnetic spectrum	电磁频谱	refraction	折射
fiber-optic cable	光纤电缆	RJ45	
gauge	规格	shielded twisted-pair (STP)	屏蔽双绞线
ground propagation	地面	single-mode fiber	单模光纤
guided media	有向介质	sky propagation	天空传播
horn antenna	喇叭天线	straight-tip (ST) connector	直插式连接器
infrared wave	红外线	subscriber channel (SC) connector	用户通道连接器
IrDA port	IrDA 口	transmission medium	传输介质
Line-of-sight propagation	视线传播	twisted-pair cable	双绞线
Microwave	微波	unguided medium	无向介质
MT_RJ		unidirectional antenna	单向天线
Multimode grade-index fiber	多模渐变折射率光纤	unshielded twisted-pair	非屏蔽双绞线
Multimode step-index fiber	多模阶跃折射率光纤	wireless communication	无线通信

### 7.4.3 本章小结

传输介质实际位于物理层以下并直接受物理层控制。我们可以说传输介质属于零层。

有向介质在设备之间提供一条物理通道。双绞线由两根绞合在一起的互相绝缘的铜线组成。双绞线电缆用于语音和数据通信。同轴电缆含有中心导体和屏蔽层。同轴电缆比双绞线更能携带高频范围的信号，它用于有线电视网和传统的以太网。光缆由玻璃或塑料纤芯和环绕纤芯的包层构成，纤芯和包层封装在封套中。光纤传送光形式的数据信号，信号通过反射沿着内部纤芯传播。光纤的传输变得日益普及，原因在于它抗干扰、低衰减和高带宽性能。光纤用于主干网、有线电视网和快速以太网。

无向介质（自由空间）不使用物理导体传输电磁波。无线数据传输的形式有地面传播、天空传播和视线传播。无线波可分为无线电波、微波和红外波。无线电波是全向的，微波是单向的。微波用于移动电话、卫星和无线局域网通信。红外波用于短距离通信，如PC与外部设备之间的通信，也可用于室内局域网通信。

## **7.5 练习集**

### **7.5.1 小测验**

本书网页上能找到本章的一整套互动测试。强烈推荐，学生继续做习题前，使用这些互动测试检测他们对材料的理解。

### **7.5.2 问答题**

Q7-1. 在 OSI 模型或因特网模型中，传输介质位于什么位置？

Q7-2. 试说出传输介质的两种主要类型。

Q7-3. 有向介质与无向介质有什么不同？

Q7-4. 有向介质主要有哪三类？

Q7-5. 双绞线缆中的绞合有什么作用？

Q7-6. 什么是折射？什么是反射？

Q7-7. 光纤中包层的用途是什么？

Q7-8. 试说出光纤与双绞线和同轴电缆相比的优点。

Q7-9. 天空传播与视线传播有什么不同？

Q7-10. 全向波和单向波有什么不同？

### **7.5.3 习题**

P7-1. 依照图 7-6，按指出的频率和距离对规格 18 非屏蔽双绞线（18-gauge UTP）的衰减（dB）填写下表。

**Table 7.5** Attenuation for 18-gauge UTP

Distance	dB at 1 KHz	dB at 10 KHz	dB at 100 KHz
1 Km			
10 Km			
15 Km			
20 Km			

原书 204 页 表中的英文词对照标记

**表 7-5** 规格 18-UTP 的衰减

距离	1KHz 时衰减 dB	10KHz 时衰减 dB	100KHz 时衰减 dB
1km			
10km			
15km			
20km			

P7-2. 使用习题 1 的结果，推论出 UTP 电缆的带宽随距离的增加而减少。

P7-3. 如果使用规格 18 的 UTP 在 1km 开始处的功率是 200mw，对于频率分别为 1kHz、10kHz 和 100kHz 的结束处的功率是多少？使用习题的结论。

P7-4. 依照图 7-9，按指出的频率和距离对 2.6/9.5mm 同轴电缆的衰减填写下表。

**Table 7.6** Attenuation for 2.6/9.5 mm coaxial cable

Distance	dB at 1 KHz	dB at 10 KHz	dB at 100 KHz
1 Km			
10 Km			
15 Km			
20 Km			

原书 204 页 表中的英文词对照标记

**表 7-6** 2.6/9.5mm 同轴电缆的衰减

距离	1KHz 时衰减 dB	10KHz 时衰减 dB	100KHz 时衰减 dB
1km			
10km			
15km			
20km			

P7-5. 使用习题 4 的结果，推论出同轴电缆的带宽随距离的增加而减少。

P7-6. 如果使用 2.6/9.5mm 同轴电缆在 1km 开始处的功率是 200mw，对于频率分别为 1kHz、10kHz 和 100kHz 的结束处的功率是多少？使用习题 4 的结论。

P7-7. 对于下列波长范围，试计算光波的带宽（假定光速是  $2 \times 10^8 \text{ m}$ ）：

- a. 1000nm 到 1200nm      b. 1000nm 到 1400nm

P7-8. 图 7-6 和图 7-9 的水平轴表示频率，而图 7-16 的水平轴表示波长。你能说明其理由吗？

如果光纤传播速度是  $2 \times 10^8 \text{ m}$ ，你能改变频率在水平轴的单位吗？垂直轴应该也被改变吗？  
曲线应该也改变吗？

P7-9. 依照图 7-16，按指出的波长和距离对光缆的衰减（以 dB 表示）填写下表。

Table 7.7 Attenuation for optical fiber

Distance	dB at 800 nm	dB at 1000 nm	dB at 1200 nm
1 Km			
10 Km			
15 Km			
20 Km			

原书 205 页 表中的英文词对照标记

表 7-7 光纤的衰减

距离	波长 800nm 时 dB	波长 1000nm 时 dB	波长 1200nm 时 dB
1km			
10km			
15km			
20km			

P7-10. 光信号通过光纤传播，试问如果光缆长度分别是 10m、100m 和 1km（假定光纤传播速度是  $2 \times 10^8 \text{ m}$ ），信号延迟是多少？

P7-11. 一束光从一种介质到另一种密度较低的介质时，临界角是  $60^\circ$ 。以下角度入射时是否有折射或者反射？画出每种情况下的光线。

- a.  $40^\circ$       b.  $60^\circ$       c.  $80^\circ$