

第 3 章 数据传输信道

本章介绍数据传输信道的基本概念,有线信道和无线信道的传输特性,以及信道容量的计算。

本章最重要的内容是有线信道和无线信道的传输特性,以及其对传输质量的影响。

* 3.1 信道

数据通信的质量不仅与传送的信号、收/发两端设备的特性有关,而且还要受到传输信道的质量及传输信道沿途不可避免的噪声干扰的直接影响,所以传输信道是影响通信质量的重要因素之一。

3.1.1 信道概述

在数据通信系统中,可从两种角度来理解传输信道(以下简称信道):一种是将传输媒体和完成各种形式的信号变换功能的设备都包含在内,统称为广义信道。广义信道还可根据具体的研究对象和所关心的问题不同,定义出不同类型,如调制信道、编码信道等。另一种是仅指传输媒体(如双绞线、电缆、光纤、短波、微波等)本身,称为狭义信道。狭义信道还可定义为“能够传输信号的任何抽象的或具体的通路”。图 3-1 展示为广义信道与狭义信道。

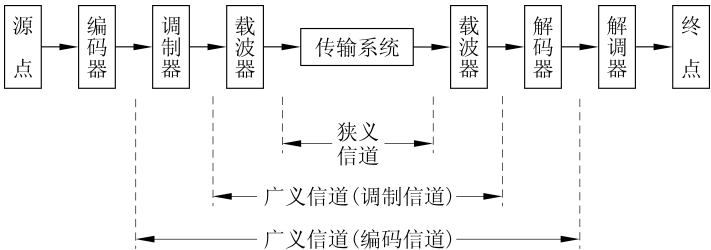


图 3-1 广义信道与狭义信道

由此可见,信道为信号传输提供了通路,是沟通通信双方的桥梁。必须指出,任何一种能够传输信号的传输媒体,它既为信号提供通路,又对信号造成损害。这种损害具体反映在信号波形的衰减和畸变上,最终导致通信出现差错现象。还需指出,信道和电路是两个并不等同的概念。信道一般都是用来表示某一个方向传送信息的媒体,因此一条通信电路往往包含一条发送信道和一条接收信道。信道是电路的逻辑部件。

3.1.2 信道分类

信道分类的方法很多,常见的分类有4种。

- (1) 按照信道上允许传输的信号类型,分为模拟信道和数字信道。
- (2) 按照信道上信号传送方向与时间的关系,分为单工、半双工和全双工信道。
- (3) 按照使用信道的方法分为专用(租用)信道和公共交换信道。
- (4) 按照信道采用传输媒体的不同,分为有线信道和无线信道。

信道中解决数据传输的问题,其基本方法有两种:一种是设计并构成专门传输数据的信道,此方法投资大,见效慢,但可以得到较好的性能;另一种是利用现有信道(如电话信道)来传输数据。为了设计适合于数据传输的信道,必须充分了解各种传输媒体的特点及有关信道设备参数的计算。在某些数据通信业务量不太大的场合,利用现有信道来实现数据传输是一种既经济又可行的方案,但必须充分了解现有信道对传输数据的影响和限制。

3.2 有线信道

有线信道是利用人造的导引型传输媒体来传输信号,电磁波是沿着某一传输媒体同向传播的。由于信号的能量集中在传输媒体附近,因此传输效率高,但是部署不够灵活。它是现代通信网中最常用的信道之一。有线信道采用的传输媒体主要有4种,即明线(Open Wire)、电缆(对称电缆(Symmetrical Cable)和同轴电缆(Coaxial Cable))、电力线(Electric Line of Force)和光缆(Optical Fiber)。

3.2.1 明线

明线是指平行架设在电线杆上的架空线路,它本身是导电裸线或带绝缘层的导线(铜线和铝线)。明线的优点是线路损耗低,架设简单。缺点是对外界噪声和干扰较敏感,易受暴风雨和冰雪的影响以及人为破坏。

20世纪初曾大量采用架空明线,目前许多国家都已停止使用明线,中国也只在农村或边远地区采用,市内明线已被对称电缆所取代,长途线路则让位于同轴电缆或光缆。

* 3.2.2 电缆

电缆有两类,即对称电缆和同轴电缆。

1. 对称电缆

对称电缆是由若干对叫作芯线的双导线放在一根保护套内制成的,芯线直径为0.4~1.4mm。为了减小每对导线之间的干扰,每一对导线都做成扭绞形状,又称为双绞线。双绞线是最古老而又最常用的传输媒体,它由两根具有绝缘保护层的铜导线按一定规则互相绞缠在一起形成的线对构成的。双绞线的缠绕密度、扭绞方向和绝缘材料,直接影响它的特性

阻抗、衰减和近端串扰。常用的双绞线内含4对线,按一定密度反时针互相扭绞在一起,其外部包裹着金属层或塑橡胶外皮,起着屏蔽外来干扰和邻近线缆串扰的作用。双绞线的通信距离一般在几千米到几十千米,距离太远需用放大器把信号放大,或者使用中继器对信号进行整形。双绞线既可用于传输模拟信号,也可用于传输数字信号。其带宽取决于铜线的直径和传输距离。由于双绞线具有良好的传输特性,以及较低的经济成本,所以它的应用十分广泛,它不仅用于电话网的用户线,也常用于室内通信网的综合布线。

为了提高抗电磁干扰的能力,双绞线按其外部是否包裹金属层和塑橡胶外皮,可分为无屏蔽双绞(Unshielded Twisted Pair,UTP)线和屏蔽双绞线。

无屏蔽双绞线是由多对双绞线外包缠一层塑橡胶护套层构成的。图3-2(a)示出了4对无屏蔽双绞线的外形。这种线根据每对线的绞距与所能抵抗电磁辐射及干扰成正比,结合滤波和对称等技术,经由精确的生产工艺制成,可减少线对间的电磁干扰。无屏蔽双绞线因无屏蔽层,所以具有价廉、安装简单和节省空间等优点。

屏蔽双绞线与无屏蔽双绞线一样,也有塑橡胶的护套层,但在护套层内增加了金属层。按所增加的金属屏蔽层的数量和绕包方式,又可分为金属箔双绞(Foil Twisted Pair,FTP)线、屏蔽金属箔双绞(Shielded Foil Twisted Pair,SFTP)线和屏蔽双绞(Shielded Twisted Pair,STP)线3种,如图3-2(b)~图3-2(d)所示。屏蔽双绞线比无屏蔽双绞线价格要贵,且使用也不是十分方便。

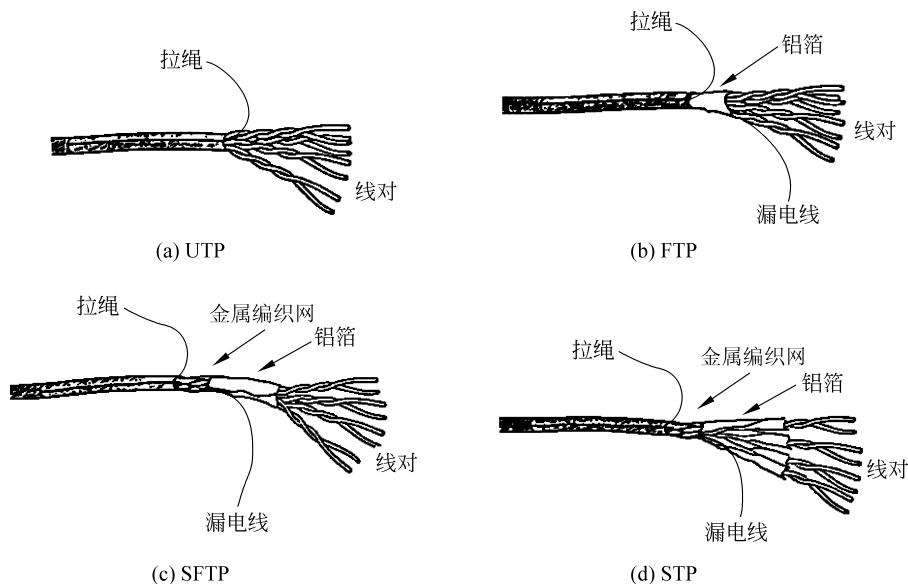


图 3-2 双绞线

1991年,美国电子工业协会EIA公布了EIA-568标准,即“商业建筑电信电缆标准”。该标准规定了室内数据通信的屏蔽双绞线和语音级无屏蔽双绞线的使用规约。为了适应局域网传输速率的提高,EIA于1995年又公布了EIA-568-A标准。该新标准包含100 Ω 无屏蔽双绞线和150 Ω 屏蔽双绞线,还涉及电缆和连接器设计及测试手段的进展。EIA-568-A将无屏蔽双绞线分为3类、4类和5类三大类。目前常用的是3类和5类UTP。3类和5类UTP的区别在于绞距不同,5类UTP的典型绞距是0.6~0.85cm,而3类UTP的绞距

是 7.5~10cm,可见 5 类 UTP 绞合得更紧密,但价格也较贵。3 类和 5 类 UTP 的数据传输速率分别可达 16Mb/s 和 100Mb/s。自 EIA-568-A 公布以来,人们对现有的双绞线提出了更高的性能要求,于是又出现了 5 类增强型、6 类以及 7 类双绞线。表 3-1 列出了常用双绞线的应用情况。

表 3-1 常用双绞线的应用情况

类别	带宽/MHz	典型应用
3	16	低速网络,如模拟电话网
4	20	短距离的以太网,如 10BASE-T
5	100	10BASE-T 以太网,某些 100BASE-T 快速以太网
5E(超 5)	100	100BASE-T 快速以太网,某些 1000BASE-T 吉比特以太网
6	250	1000BASE-T 吉比特以太网,ATM 网络
7	600	可用于 10 吉比特以太网(只使用 STP)

2. 同轴电缆

同轴电缆是由内外两层同心圆柱形导体构成,在这两根导体间用绝缘体隔离开。内导体多为实心导线,外导体是一根空心导电管或金属编织网,在外导体外面有一层绝缘保护层,在内外导体之间可以填充满塑料或用空气作为电介质,同时用塑料支架用于连接和固定内外导体,起到支撑和绝缘的作用。由于外导体通常接地,因此能够起到很好的屏蔽作用。同轴电缆的结构和屏蔽性使得它既有很高的带宽,又有很好的抗干扰特性,因而能够获得较高的传输速率。同轴电缆的示意图如图 3-3 所示。

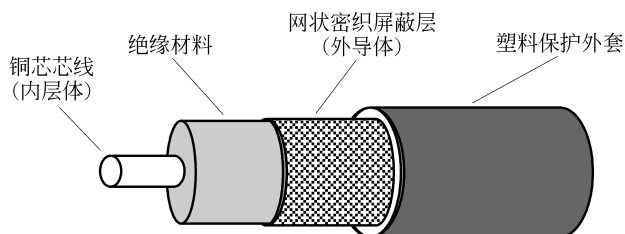


图 3-3 同轴电缆的示意图

在实际应用中,通常将数根同轴电缆放在一个大的电缆护套内,其间还可装入一些两芯扭绞线对或四芯线组,作为传输控制信号之用。根据内、外导体尺寸 a 、 b 的不同,同轴电缆可分为中同轴(2.6/9.5mm)、小同轴(1.2/4.4mm)及微同轴(0.7/2.9mm)等标准规格。对于前两种同轴电缆, $b/a \approx 3.6$,此时衰减常数 α 为最小,其特性阻抗近似为 75Ω 。

同轴电缆还可按其特性阻抗的不同,分为两类:一类是 50Ω 同轴电缆(又称为基带同轴电缆),用于传送基带信号,其距离可达 1km,传输速率为 10Mb/s;另一类是 75Ω 同轴电缆(又称为宽带同轴电缆),可作为有线电视的标准传输电缆,其上传送的是频分复用的宽带信号。

同轴电缆具有寿命长、容量大、传输稳定、受外界干扰小、维护方便等优点,不过随着光缆的大量普及,同轴电缆的应用受到激烈的竞争。

3.2.3 电力线

电力线是指传输电能的输电线路。输送电能是利用变压器将发电机发出的电能升压后,再经断路器等控制设备接入输电线路,使得电磁能量沿着输电线路的方向传输出去。按结构形式的不同,输电线路分为架空输电线路和电缆线路。其中,架空输电线路由线路杆塔和电力线组成。电力线把电能输送到千家万户,室内的电线又把电能分布到每个电源插座上。

电力线通信(Power Line Communication, PLC)的全称是电力线载波通信,是指利用高压电力线(在电力载波领域通常指 35kV 及以上电压等级)、中压电力线(指 10kV 电压等级)或低压配电线(380/220V 用户线)作为信息传输媒体进行语音或数据传输的一种特殊通信方式。由于输电线路具备十分牢固的支撑结构,并架设 3 条以上的导体(一般有 3 根良导体及 1 或 2 根架空地线),所以输电线在输送工频电流的同时,也传送载波信号,既经济又十分可靠。这种综合利用早已成为世界上所有电力部门优先采用的特有通信手段。

电力线通信中使用的调制解调器(简称电力猫)是通过电力线进行宽带上网的 Modem 的俗称。使用家庭或办公室现有电力线和插座组建成网络,通过连接 PC、ADSL Modem、机顶盒、音频设备、监控设备以及其他的智能电气设备,来实现数据、语音和视频信号的传输。它具有即插即用的特点,能通过普通家庭电力线传输网络 IP 数字信号。

电力线通信具有投资少、连接方便、传输速率高、安全性好和使用范围广等特点,但目前还存在无法提供高质量的数据传输业务,而且可能发生一些不可预知的麻烦(如家庭电器产生的电磁波干扰和数据信号在电线上严重的衰减等),不过随着技术的进步,这些问题将会逐步得到解决。

* 3.2.4 光缆

在通信领域中,信息传输速率由 20 世纪 70 年代的 56kb/s 提高到目前使用光纤技术的 100Gb/s,因此光纤通信已成为现代通信中的一项重要技术。

光导纤维(以下简称光纤)是目前应用日趋广泛的一种导引型传输媒体。光纤是一种新型的光波导,其结构一般是双层或多层的同心圆柱体,由纤芯、包层和护套组成,如图 3-4 所示。纤芯的直径为 $8\sim 50\mu\text{m}$,主要成分是高纯度的石英(SiO_2)。包层的直径小于 $125\mu\text{m}$,也由石英制成,但掺入了极少量的掺杂剂,如五氧化二磷(P_2O_5)和二氧化锗(GeO_2),起到提高纤芯折射率的作用。纤芯的折射率 n_1 应大于包层的折射率 n_2 ,其数量关系为 $\Delta=(n_1-n_2)/n_1\approx 0.01$ 。为了提高光纤的机械强度和传输特性,实用的光纤在包层外面还分别有一次涂覆层($5\sim 40\mu\text{m}$)、厚的缓冲层($100\mu\text{m}$)和二次涂覆层(即套塑层)。最外层是护套,由塑料或其他物质构成,用来保护其内部并抵御

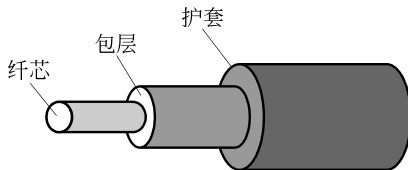


图 3-4 光纤的结构

潮湿、磨损、碰撞和其他来自外部的伤害。

图 3-5 表示光线在纤芯中的传播情况。由于纤芯的折射率 n_1 大于包层的折射率 n_2 , 当光线到达纤芯与包层的界面时, 将使其折射角 φ_2 大于入射角 φ_1 。如果入射角足够大, 就会出现全反射, 光线重新折回纤芯, 并不断向前传播。

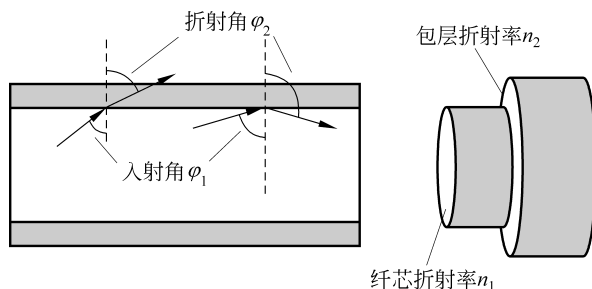


图 3-5 光线在纤芯中的传播

光纤中光信号的传输是基于全反射原理。图 3-6 表示光纤通信中实际应用较多的 3 种光纤, 它们的传输模式是不同的。

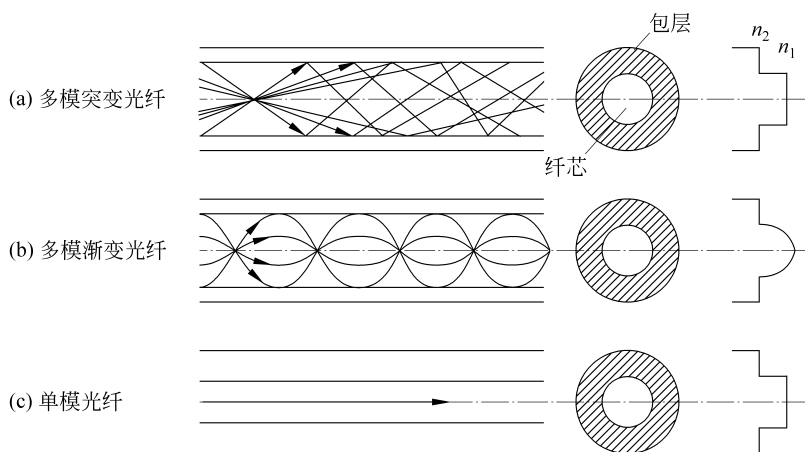


图 3-6 不同传输模式的实用光纤

(1) 多模突变光纤(又称为阶跃光纤)。指光纤的纤芯和包层的折射率沿光纤的径向分布是均匀的, 而在两者的交界面上发生突变。这种光纤的带宽较窄, 适用于小容量短距离通信。

(2) 多模渐变光纤。指纤芯的折射率是其半径 r 的函数 $n(r)$, 沿着径向随 r 的增加而逐渐减小, 直到达到包层的折射率值为止, 而包层内的折射率又是均匀的。此类光纤带宽较宽, 适用于中容量、中距离通信。

(3) 单模光纤。指纤芯中仅传输一种最低模式的光波, 由于纤芯直径很小(通常为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$), 制作工艺难度大。其折射率分布属于突变型。单模光纤的带宽极宽, 适用于大容量远距离通信。

光纤的信号光源可以有发光二极管(Light-Emitted Dioxide, LED)和激光。LED 光源光谱纯度低, 不同波长的光信号在光纤中传播速度不同。

影响光纤传输质量的因素是光纤的损耗特性和频带特性。

光纤的损耗特性表示光能在光纤中传输所受到的衰减程度。通常用 dB/km 来表示,其定义是

$$\alpha(\lambda) = \frac{10}{L} \times \lg \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{dB/km}) \quad (3-1)$$

式(3-1)中, L 为光纤长度, P_1 为光纤输入端的功率, P_2 为光纤输出端的功率。

光纤损耗可简单地分为固有损耗和非固有损耗两大类。固有损耗是指由光纤材料的性质和微观结构引起的吸收损耗和瑞利散射损耗。非固有损耗是指杂质吸收、结构不规则引起的散射和弯曲辐射损耗等。从原理上讲,固有损耗不可克服,它决定了光纤损耗的极限值。而非固有损耗可以通过完善制造技术和工艺,得到改进或消除。光纤的总损耗是各种因素影响之总和。图 3-7 展示了光纤损耗与波长的关系。

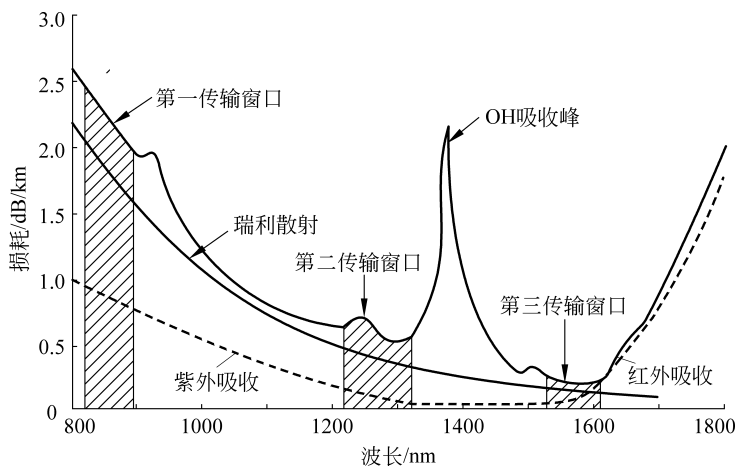


图 3-7 光纤损耗与波长的关系

图 3-7 中,在波长 $0.8 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 范围内,出现 3 个较低损耗的波段区域,它们常被用作光纤通信的工作波段,称为“窗口”。常用的窗口波长为 $0.85 \mu\text{m}$ 、 $1.3 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 。如吉比特以太网 1000Base-SX 物理接口就采用波长为 $0.85 \mu\text{m}$ 的信号光源,而吉比特以太网 1000Base-LX 物理接口则采用波长 $1.31 \mu\text{m}$ 的信号光源。在波长 $1.4 \mu\text{m}$ 附近的损耗高峰是由光纤材料中水分子的吸收所造成。1998 年朗讯科技(Lucent Technologies)发明了一项技术可以消除这一高峰,从而大大扩展了可用的波长范围。

光纤的频带特性直接影响传输波形的失真情况和传输容量。它通常以兆赫千米(MHz/km)来表示,意即 1km 长的光纤所具有的带宽能力。光纤的频带特性与光纤传光时的色散性能有关。由光纤传输的模式理论可知:光能是由若干模式的电磁波传送的,不同模式的电磁波在光纤中的传送速度是不同的,即使是同一模式的电磁波其传速也随着波长或材料折射率的不同而变化。这种传送速度随模式、波长或材料变化的性质称为光纤的色散特性。模式之间的传速差异,称为模间色散。单一模式内,因波长或材料引起的传速差异,称为模内色散。多模光纤中两种色散均存在,但以模间色散为主。单模光纤只存在模内色散。光纤的色散特性对传输质量的影响,体现在传输波形的畸变上,即存在时延差和脉冲展宽,从而限制了频带宽度。

随着传输距离的增加,光信号传播因色散会造成信号的失真,这就限制了光纤传输的距

离。因此,在长距离传输时,每隔一段距离都需要对信号进行中继。单模光纤的色散要比多模光纤的色散小得多,因而无中继传输距离更长,采用光谱纯度高的激光源传输时引起的色散则更小。

光纤通信与其他通信方式相比,有许多明显的优点。

- (1) 可供利用的频带很宽。理论上比微波通信容量高 $10^4 \sim 10^5$ 倍。
- (2) 衰耗很小,大大增加无中继传输距离。
- (3) 在很宽的运用频带内,光纤的衰减与频率基本上无关,接收端可以不采取幅度均衡措施。
- (4) 防窃听,保密性能好。
- (5) 制造光纤的原料丰富,且用料极省。如制造 1km 八管中同轴电缆需要耗铜 120kg、铅 500kg;而同样长度的光纤只需 40g 石英玻璃。
- (6) 易施工敷设和扩容处理。

随着传输信息的种类越来越多,由于光纤能提供很高的带宽和较高的性价比,因此在长途干线、市区干线、农用交换干线、用户环路、局域网和军事等应用领域中的优势也越来越明显。

3.3 无线信道

无线信道是对无线通信中发送端和接收端之间通路的一种形象比喻。对于无线电波而言,发送端到接收端之间并没有一个有形的连接,它的传播路径也可能不止一条,为了形象地描述发送端与接收端之间的工作,可以想象两者之间有一个看不见的道路衔接,这条衔接通路俗称无线信道。

电磁波在空间的传播已被广泛地用作通信手段。原则上,任何频率的电磁波都可以产生,但是,电磁波的发送和接收要用天线来进行。为了有效地发射和接收电磁波,天线的尺寸应不小于电磁波波长的 $1/10$ 。因此,频率过低,波长过长,则天线难于制造。例如,电磁波频率为 1000Hz,则波长为 300km,此时要求的天线尺寸大于 30km。所以,通常用于通信的频率都比较高。实用中将电磁波的频率划分为若干频段(Frequency Band),或按波长划分为若干波段(Wave Band),电磁波频段或波段划分如表 3-2 所示。

表 3-2 电磁波频段或波段的划分

序号	频段名称	频段符号	频段范围 (仅含上限)	波段名称	波长范围 (仅含上限)	传播模式
1	极低频	ELF	3~30Hz	极长波	100 兆米~10 兆米	空间波为主
2	超低频	SLF	30~300Hz	超长波	10 兆米~1 兆米	空间波
3	特低频	ULF	300~3000Hz	特长波	100 万米~10 万米	空间波为主
4	甚低频	VLF	3~30kHz	甚长波	10 万米~1 万米	空间波为主
5	低频	LF	30~300kHz	长波	10 千米~1 千米	地波为主

续表

序号	频段名称	频段符号	频段范围 (仅含上限)	波段名称	波长范围 (仅含上限)	传播模式
6	中频	MF	300~3000kHz	中波	1000 米~100 米	地波与天波
7	高频	HF	3~30MHz	短波	100 米~10 米	天波与地波
8	甚高频	VHF	30~300MHz	超短波	10 米~1 米	空间波
9	特高频	UHF	300~3000MHz	分米波	10 分米~1 分米	
10	超高频	SHF	3~30GHz	厘米波	10 厘米~1 厘米	
11	极高频	EHF	30~300GHz	毫米波	10 毫米~1 毫米	
12	至高频		300GHz~3THz	米波	亚毫米波	0.1 毫米~1 毫米
13			43~430THz		红外	7 微米~0.7 微米
14			430~750THz		可见光	0.7 微米~0.4 微米
15			750~3000THz		紫外线	0.4 微米~0.1 微米

注 1: 1kHz=10³ Hz,1MHz=10⁶ Hz,1GHz=10⁹ Hz,1THz=10¹² Hz,1mm=10⁻³ m,1μm=10⁻⁶ m。

注 2: 通常把 1~300GHz 的频段称为微波(Microwave)频段,按 IEEE 的规定将微波波段细分为若干个频段: L 频段(1.0~2.0GHz)、S 频段(2.0~4.0GHz)、C 频段(4.0~8.0GHz)、X 频段(8.0~12.0GHz)、Ku 频段(12.0~18.0GHz)、K 频段(18.0~26.5GHz)、毫米波 K_a 频段(26.5~40.0GHz)、Q 频段(33.0~50.0GHz)、U 频段(40.0~60.0GHz)、V 频段(50.0~75.0GHz)、E 频段(60.0~90.0GHz)、W 频段(75.0~110.0GHz)、F 频段(90.0~140.0GHz)、D 频段(110.0~170.0GHz)和 G 频段(140.0~220.0GHz)。

由于各个频段无线电波的应用范围也有所不同,表 3-3 给出了不同频段无线电波的典型应用。

表 3-3 不同频段无线电波的典型应用

序号	频段名称	频段/波段符号	典型应用
4	甚低频	VLF	海岸与潜艇通信,海上导航,水下通信,声呐
5	低频	LF	大气层内中等距离通信,地下岩层通信,海上导航,海下通信,无线电信标
6	中频	MF	广播,海上通信,测向,遇险求救,海岸警卫
7	高频	HF	远距离短波通信,电话,远程广播,救生,机船和船岸通信,业余无线电
8	甚高频	VHF	电视,调频广播,陆地空中交管,雷达,导航,散射通信,移动通信
9	特高频	UHF	电视,微波接力通信,雷达,散射通信,移动通信,卫星通信
10	超高频	SHF	气象和机载雷达,微波接力通信,卫星通信,移动通信
12	至高频	亚毫米波	未划分,实验用
13		红外	光通信系统
14		可见光	光通信系统
15		紫外线	光通信系统

由于电磁波传播无国界,同时考虑无线电频率资源的特性(如有限性、非耗竭性、排他性和易受污染性),因此在国际上应保持良好的电磁环境,以避免不同通信系统间的干扰,为此ITU制定了频率使用的有关协议。各国在此国际协议的基础上再分别制定本国的无线电频率使用规则。我国的无线电频率规划和管理工作由工业和信息化部无线电管理局具体负责。

电磁波在非空间传播时易受地面和大气层的影响。根据通信距离、频率和地理位置的不同,电磁波的传播可以有以下5种传播模式。

(1) 地波传播。无线电波沿着地球表面传播,称为地波传播或地表波传播。

(2) 空间波传播。无线电波直接由发射天线传向接收天线,另一部分经地面反射后传向接收天线,这两部分电波合成,称为空间波传播。

(3) 天波传播。无线电波在高空经电离层反射到达接收天线的传播方式,称为天波传播。

(4) 散射传播。包括对流层散射传播和电离层散射传播两种模式,统称散射传播。

(5) 地空传播。无线电波穿透电离层的直射传播模式,称为地空传播。

在有线信道一节中,介绍了4种导引型传输媒体,它们是当今通信领域中不可或缺的通信传输手段。但当此类通信线路需要通过岛屿、高山或湖泊时,架设它就不是件轻而易举的事。若通信距离遥远,则线路架设成本等经济问题更应得到重视。另外,当今社会的生活节奏加快,人们不但要求固定地点间能够进行话音和数据通信,还要求在行进中能够进行通信(即移动通信),因此寻求简单、经济的通信手段就显得十分必要,而无线电波在自由空间传播的特性正好能够满足人们的这种需求。

以自由空间为传输电磁波的手段的非导引型传输媒体,指电磁波在大气层、外层空间或海洋中进行的无线传输。由于电磁波的特性与频率有关。在低频段,电磁波能很好地穿透障碍物,但随着传输距离的增大,其能量将以 $1/r^2$ 的速率进行衰减(r 为传输距离)。在高频段,电磁波倾向于以直线传播,遇到障碍反射物会被反射,更易受雨、雾、雪等自然条件和大气层自然环境的影响,所有频率都会受到外来的干扰。

下面介绍几种常用的非导引型传输媒体的通信方式。

3.3.1 超长波通信

超长波通信(Super-Long Wave Communication)是利用波长为 $10\sim 1\text{Mm}$ (频率为 $30\sim 300\text{Hz}$)的电磁波进行的无线电通信,也称超低频通信。国外称为极低频(Extremely Low Frequency, ELF)通信。

由于超长波在地球表面与电离层下界之间形成的球形的天然波导,超长波在此封闭的波导中传播时,只有极少的能量漏入波导壁,传播衰减小且稳定,如频率为 40Hz 的大气传播衰减约 0.7dB/Mm ;频率为 200Hz 时约 2.5dB/Mm ,仅以数瓦的辐射功率,即可实现数兆米距离的通信。超长波在海面上空传播时,只有很少的能量进入海面,但从海面向深处传播时衰减较小。

超长波通信的优点是基本上不受磁暴、太阳黑子爆发、核爆炸等极端恶劣的情况下引起的电离层骚扰的影响,传输稳定可靠,衰减小,通信距离可达数兆米乃至覆盖全球。超长波

还有很强的穿透海水和土壤的能力,穿透海水深度超过 100m,适合于潜艇水下通信。缺点是发信设备和天线系统庞大,信道频带很窄,通信速率极低。只适于岸台对深潜潜艇的单向发信。

提高发射天线的辐射效率,寻求辐射超长波的新方法,改进接收天线,采用新的调制解调和编译码技术,是发展超长波通信技术的主要方向。

图 3-8 为超长波通信示意图。

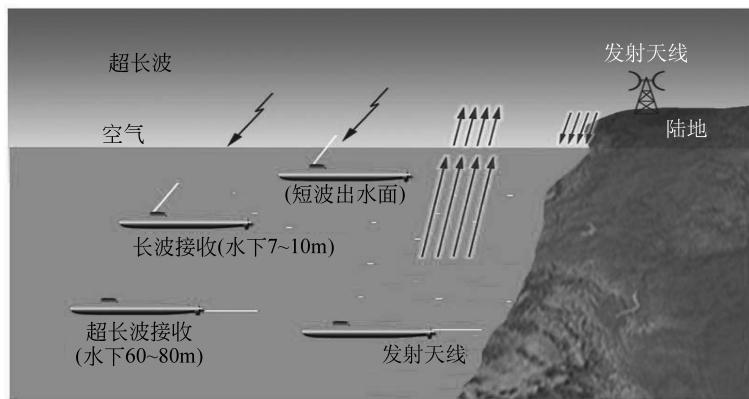


图 3-8 超长波通信示意图

3.3.2 长波通信

长波通信(Long-Wave Communication)是利用波长长于 1000m(频率低于 300kHz)的电磁波进行的无线电通信,也称低频通信。长波通信的历史,可追溯到 1901 年意大利物理学家马可尼进行的跨越大西洋的越洋通信试验。1925 年后,由于发现短波能靠电离层反射进行远距离传播,才逐步用短波通信取代长波通信。第二次世界大战中,因对潜艇通信的需要,更重视发展长波通信。随着导弹、核武器的发展,导致越来越多的军事设施转入地下,长波地下通信将是保障地下指挥所和坑道间应急通信的重要手段。

长波通信还可细分为在长波、甚长波、超长波和极长波波段的通信。

长波通信也称低频通信,它以地波传播为主。地波传播主要与大地的导电率有关,传播较稳定。在陆地一般传播距离达几十千米到几百千米,地波在海面上传播时,海水导电率高,衰减较小,传播距离比陆地要远得多,可达数百到数千千米。在频段高端(150~300kHz),大气噪声较小,天线效率较高,可通电话和电报,广泛用于海上通信。在频段低端(30~60kHz),电磁波能穿透一定深度的海水,可以用于对水下舰艇的通信。长波具有穿透岩石和土壤的能力,也用于地下通信。长波因频带窄,只能通电报或低速数据。图 3-9 为长波通信的示意图。

甚长波通信也称甚低频通信。通常使用 10~30kHz 频段,传播衰减更小,在远距离通信时主要靠大地与低电离层间形成的波导进行传播,距离可达数千千米乃至覆盖全球。波导传播中也存在多模干涉现象,这会带来幅度、相位等波动,但这一频段的电磁波传播比较稳定,受电离层骚扰和高空核爆炸的影响较小,通信可靠。甚长波穿透海水能力较强,适用

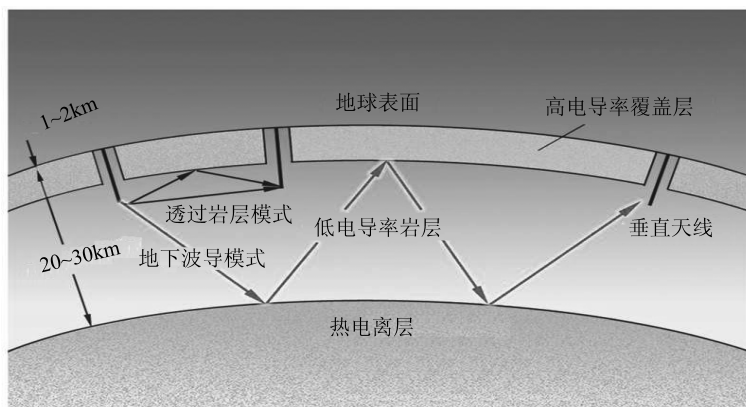


图 3-9 长波通信示意图

于对水下舰艇的远距离通信、海面舰艇的通信,以及时间和频率标准的广播。甚长波通信的特点是系统庞大、占地广、功率大、造价高、通带较窄,速率一般为数十波特,只能通电报或低速数据。

超长波通信也称超低频通信。这一频段的电磁波传播十分稳定,在海水中衰减很小(频率 75Hz 时,衰减约为 0.3dB/m),对海水穿透能力很强,可深达 100m 以上,可用于对远距离和在大深度下航行的战略导弹核舰艇的通信。由于波长很长(75Hz 波长为 4000km),发射天线由长达数十甚至上百千米的两端接地的导线组成(埋地或低架),并选用花岗岩等导电率极低的地区作为发信场地。当电流流经地层形成回路时,因导电率很低,其集肤深度很深,从而形成一个等效环形发射天线,利用相互垂直的两根导线可形成全向天线。天线效率低,在接收端还需要采用许多先进技术(如最小移频键控调制 MSK 和卷积编码序列译码等),并用计算机对接收信号进行处理以获取在很低信噪比条件下检测到微弱信号的效果。通信速率很低,一个码元长达 30 多秒,只能发简短报文。有时这种通信只起到“振铃”作用,舰艇在深水中收到信号就上浮到一定深度再用甚长波接收岸上发来的正式报文。

极长波通信也称极低频通信。这一频段的电磁波频段在陆地和海水中传播衰减都很小,用于对数百米海水下的舰艇进行通信很有前途,但因波长太长,用一般常规技术很难实现。

* 3.3.3 短波通信

短波通信(Short Wave Communication)是利用波长为 100~10m(或频率为 3~30MHz)的电磁波进行的无线电通信。实用短波范围已被扩展为 1.5~30MHz。短波既可沿地球表面以地波形式传播,也能以天波的形式靠电离层反射传播。这两种传播形式都具有各自的频率范围和传播距离,只要选用合适的通信设备,就可以获得满意的收信效果。频率较低(在 2MHz 以下)的短波是沿着弯曲的地球表面传播的,它具有一定的绕射能力,这种传播方式称为地波传播。地波传播的距离可达数百千米。陆地对地波衰减很大,其衰减程度随频率升高而增大,一般只在离天线较近的范围内(100km 左右)才能可靠地收信。海水对地波衰减较小,沿海面传播的距离要比陆地传播距离远得多。因此,短波主要靠

天波传播,借助于电离层的一次或多次反射,达到远距离(几千千米乃至上万千米)通信的目的。

电离层是离地面高度 60~450km,受太阳紫外线和 X 射线作用而存在的由离子、自由电子和中性分子、原子组成的一个区域。电离层是一层半导电媒体,其相对介电常数为

$$\epsilon_r = 1 - 80.8 \times N_e / f^2 \quad (3-2)$$

式(3-2)中, N_e 为电子密度(电子数/立方米),它与高度有关,在某一高度出现最大值; f 是信号频率(Hz)。

根据实际观测,电离层由环绕地球处于不同高度的 4 个导电层(D、E、 F_1 和 F_2)组成,如图 3-10 所示。其中,D 层和 E 层仅在白天出现,夜间消失。在 E 层的上限高度 120km 处,偶尔会出现很高电子密度的电离层 E_s ,称为偶发 E 层。对短波通信起主要作用的是 F 层,在白天,F 层又可分为 F_1 和 F_2 两层,到夜晚 F_1 层消失。F 层的高度随季节和时间而变化。为了保持昼夜短波传输正常,一般选用夜间的工作频率低于白天的工作频率,否则因电波穿透电离层,会引起通信中断。

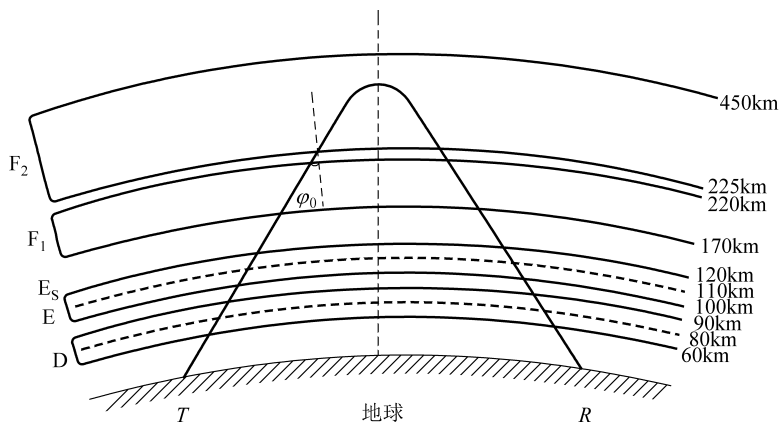


图 3-10 电离层的构成

短波电波穿越电离层时,为什么会引起反射呢?这是因为在一定的范围内,电离层的电子密度随高度的增加而增加,因而电离层的相对介电系数 ϵ_r 和折射率 $n = \sqrt{\epsilon_r}$ 将随高度的增加而减小。当短波穿越电离层时,将产生折射使轨迹弯曲,最终在某一高度发生全反射,电波被折回地面。不过,D、E 层因电子密度低,不满足反射条件,仅引起吸收损耗,且频率越低损耗越大。 F_2 层才是主要的反射层。

基于短波传输主要是依靠电离层反射来实现,而电离层又随季节、昼夜,以及太阳活动的情况而变化,这就导致电离层的不稳定性,所以短波传输不及其他通信方式稳定可靠。衡量短波信道的性能的主要技术指标是通信质量和可通率。通信质量可用信噪比和差错率来表示。可通率又称为线路利用率,是指通信线路接收端的信噪比 r 高于可接受的最低信噪比 $r_{\min}$ 的时间百分比。如可通率为 98%,指一天中仅有 2% 的时间(约 28.8min)通信不可靠会造成通信中断现象,而其余时间均可保证正常通信。

正确选择短波通信的工作频率非常重要。在一定的电离层条件下,存在一最高可用频率 MUF。所谓最高可用频率是指实际通信中能被电离层反射回地面的电波的最高频率,

它取决于电离层电子密度的最大值 $N_{e\max}$ 和电波射入电离层的入射角 φ_0 (见图 3-10), 可用公式表示为

$$\text{MUF} = \begin{cases} f_n = \sqrt{80.8 N_{e\max}} & (\varphi_0 = 0) \\ f_n \sec \varphi_0 & (\varphi_0 \neq 0) \end{cases} \quad (3-3)$$

式(3-3)中, f_n 称为临界频率。其实, MUF 是电波能返回地面或刚穿出电离层的临界值。考虑电离层结构随时间的变化, 为保证获得长期稳定的接收, 在选择短波工作频率时, 不能取预报的 MUF 值, 而是取低于 MUF 的最佳工作频率 FOT, 通常选取 $\text{FOT} = 0.85 \text{ MUF}$ 。实测表明, 当选用 FOT 后, 短波传输的可通率可达 90%。为了便于用户在不同地区、不同时间选取较好的工作频率, ITU 定期在 *Telecommunication Journal* 杂志上提前发布频率预报——电离层传播基本指标。我国无线电管理委员会也预报 E、F 层的最高可用频率。

图 3-11 为短波通信示意图。

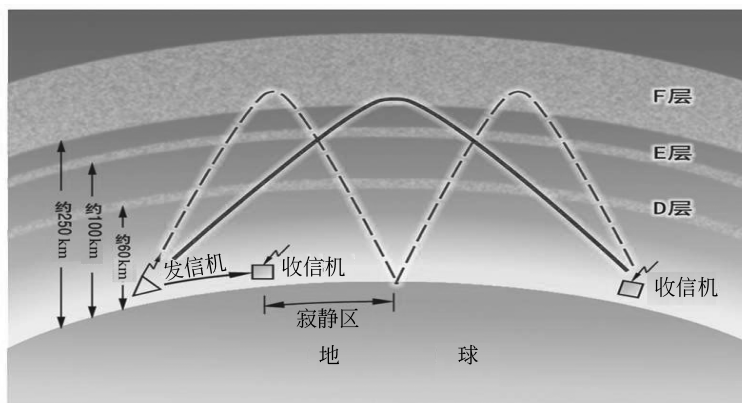


图 3-11 短波通信示意图

如图 3-11 所示, 短波电波通过若干条路径或者不同的传播模式由发信点到达收信点, 这种现象称为多径传播。不同路径的时延差称为多径时散。图 3-12 表示引起多径时散的主要因素, 它们是: ①电波由电离层一次或多次反射; ②电离层反射区的高度不同; ③地球磁场引起的寻常波与非寻常波; ④电离层的不均匀性引起的漫射现象。其中, 以第一种因素造成的多径时延差为最大, 可达数毫秒。多径时散与路径长度、工作频率、昼夜、季节等因素有关。多径时散对数据通信的影响主要体现在码间干扰上。为了保证传输质量, 通常采用限制数据传输速率。若要进行高速数据传输, 则应采取多径并发等措施。

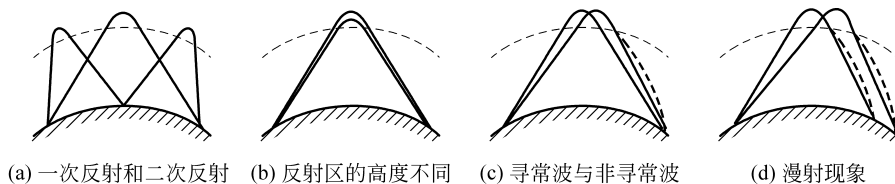


图 3-12 引起多径时散的几种主要因素

在短波传输过程中, 收信电平出现忽高忽低随机变化的现象, 称为“衰落”。衰落按其持续时间的长短有快衰落与慢衰落之分。信号起伏持续时间仅几分之一秒的称为快衰落, 而

慢衰落的持续时间可达一小时或更长。衰落可按其成因分为3种:①由多径传播引起的干涉衰落;②由D、E层的吸收损耗所引起的吸收衰落;③由电离层反射电波引起信号相位起伏不定的极化衰落。

短波信道除自由空间传播损耗外,还有电离层吸收损耗、地面反射损耗和系统额外损耗等附加损耗。吸收损耗主要由D、E层产生,其大小与D、E层的吸收指数、发射电波仰角、工作频率和吸收区的地理位置有关。通常吸收损耗为6~25dB。地面反射损耗与地面状况、电波入射角和工作频率有关,工程计算常取一次地面反射,其损耗值为20dB。系统额外损耗是指一些尚未被人们完全认识和难以计算的损耗,其值与电离层反射区的纬度、季节、本地时间和通信距离有关,常用统计方法得到。例如中纬度地区系统额外损耗可取15~18dB。

短波传输因技术上的原因,无法抵御窃听和防止各种恶意干扰,因此它的可靠性低、通信质量差。为了克服这些缺点,近年来开发了许多新的技术,如实时信道估值(RTCE)技术、分集接收技术、现代调制技术、跳频技术和各种自适应技术等。这些新技术可提高短波通信抗干扰、抗衰落的能力。短波传输最引人注意的是,进行远距离通信时,仅需要不大的发射功率和适中的设备费用,且具有抗毁性强的中继系统(指电离层)和较高机动性的特点,因而在军事通信和移动通信方面也有着重要的实用价值。

* 3.3.4 超短波通信

超短波通信(Ultra Short Wave Communication)是利用波长10~1m(频率为30~300MHz)的无线电波传输的无线电通信,也称米波通信。超短波通信主要依靠地波传播和空间波视距传播。整个超短波的频带宽度为270MHz,是短波频带宽度的10倍。由于频带较宽,因而被广泛应用于电视、调频广播、雷达探测、移动通信、军事通信等领域。

超短波通信的主要特点:①超短波通信利用视距传播方式,比短波天波传播方式稳定性高,受季节和昼夜变化的影响小;②天线可用尺寸小、结构简单、增益较高的定向天线,可用功率较小的发射机;③频率较高,频带较宽,能用于多路通信;④调制方式通常用调频制,可以得到较高的信噪比,通信质量比短波好。

超短波通信的优点:①频段宽,通信容量大;②视距以外的不同网络电台可以用相同频率工作,不会互相干扰;③可用方向性较强的天线,有利于抗干扰;④受昼夜和季节变化的影响小,通信较稳定。

超短波通信的缺点:①通信距离较近;②受地形影响较大,电波通过山岳、丘陵、丛林地带和建筑物时,会被部分吸收或阻挡,使通信困难或中断。

发展的主要方向:①设备全固态化,更多地采用集成电路;②采用太阳能电池等新能源;③提高抗干扰性能,压缩频带;④研制无人中继设备。

图3-13为超短波通信示意图。

* 3.3.5 地面微波

微波是指以波长为1m~1mm(或频率为300MHz~300GHz)的电磁波。地面微波传

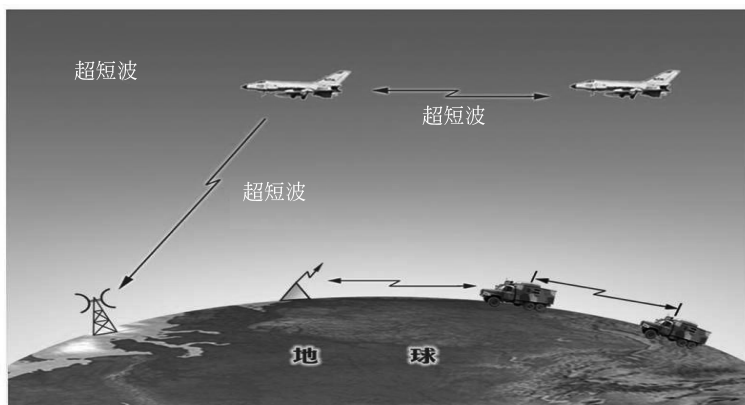


图 3-13 超短波通信示意图

输是在对流层的视距范围内进行信息传输的一种通信方式。不仅可用于长途电信业务,替代同轴电缆或光缆,还可用于建筑物间点对点的短距离传输以及蜂窝系统,是解决城市和地区间进行大容量信息传输的主要通信手段。

地面微波传输采用多路复用的工作方式,工作于射频的微波频段,其使用频率范围通常是 $1\sim 40\text{GHz}$ 。因受地形和天线高度的限制,两通信站之间的距离一般在 $40\sim 60\text{km}$ 。进行远距离通信时,可采用中继方式。因此,多路复用、射频工作和中继接力是地面微波传输的 3 个最基本的特点。图 3-14 为地面微波接力通信示意图。图中中继站的实际个数与传输距离及地貌特征有关,其作用是补偿信号能量在传输过程中的损耗,并承担转发和分路的任务。

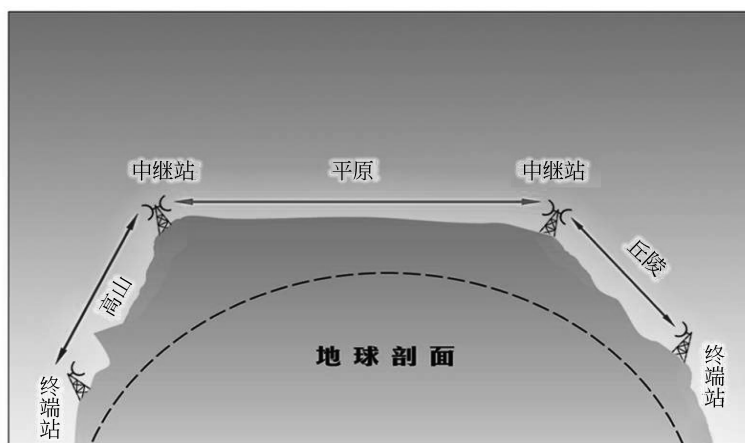


图 3-14 地面微波接力通信示意图

中继站的微波天线一般安装在地势较高的位置上。天线越高,发送出去的微波信号越不易被高大的建筑物或山丘所阻挡,传播得就越远。视距传播的两个中继站天线之间的最大距离为

$$d = 3.57(\sqrt{kh_1} + \sqrt{kh_2}) \quad (\text{km}) \quad (3-4)$$

式(3-4)中, h_1 和 h_2 分别为发送天线和接收天线的高度(m), k 是折射引起的调整系数,其

经验值为 $4/3$ 。

自然环境对微波通信有很大的影响,包括地形及大气对电波传播的影响、电波传播损耗、电波衰落等方面。

地形对微波传播带来的影响主要表现在电波的反射、绕射和地面散射等方面。其中,反射的影响是指光滑地面或水面可将天线发射的部分信号能量反射到接收天线处,对主波信号产生干涉。绕射的影响是指地面障碍物(山峰、森林、建筑物等)可能阻挡一部分电波射线,使收信点的接收电平降低。反射和绕射的影响都使接收电平在自由空间损耗的基础上再增加一些损耗。地面散射通常呈乱反射状,这对主波信号影响较小,可以忽略不计。

对流层是指地面以上大约 10km 范围内的低空大气层。对流层对电波传播的影响,主要表现在大气折射对电波传播轨迹的影响,气体分子对电波的共振吸收、雨雾中水滴对电波的散射损耗,以及对流层结构的不均匀性使气体产生折射、反射、散射等现象。其中,尤以大气折射的影响最为显著。

地面微波在对流层传播过程中,因受到对流、平流、湍流及雨、雾、雪等因素的影响,再加上少量的地面反射波,收信点的场强会产生随机性的起伏变化。接收电平随时间变化的现象,称为衰落。引起衰落的原因是多方面的,但其主要原因还在于气象条件的变化和地面效应的影响。例如,气体分子对电波的吸收衰耗、雨雾水滴表面对电波的散射会引起散射衰耗,多径传播引起的干涉型衰耗(称 K 型衰耗),以及对流层中的空气团做无规则的旋涡运动(俗称大气湍流)形成的散射衰落。

微波通信具有以下优点。

(1) 工作频带宽、通信容量大。整个频段的宽度几乎是长波、中波、短波及特高频各频段总和的 10^3 倍。

(2) 受外界干扰小,可靠性和稳定性好。

(3) 由于微波波长短,易制成高增益、方向性强的天线,通信效果较好。

(4) 属于点-点通信形式,在某种程度上克服了地形带来的不便,具有较大的灵活性。

(5) 投资省、见效快。在通信容量相同的条件下,按话路千米计算,它的线路建设费用只有电缆线路的 $1/3 \sim 1/2$ 。

其主要缺点如下。

(1) 中继站选址比较复杂,如站址选择在山顶上,对施工、维护都会带来不便。

(2) 易受自然环境(包括地形、对流层和气候条件等)的影响。

(3) 属于暴露式通信,容易被人截获窃听,通信保密性差。

* 3.3.6 卫星微波

卫星通信是在地面微波中继通信和空间技术基础上发展起来的一种通信方式。由于采用的仍是微波波段,俗称卫星微波。利用卫星实现地球站之间的通信,如果两个地球站均在同一卫星俯视的覆盖区域内,可实现即发式通信,否则只能实现存储式通信。正确选用卫星通信的工作频段是一个很重要的问题。图 3-15 为卫星通信示意图。

一般来说,选用卫星通信的工作频段必须考虑下列因素。

(1) 电波应能穿越电离层,且尽可能地减少传播损耗和外加噪声。

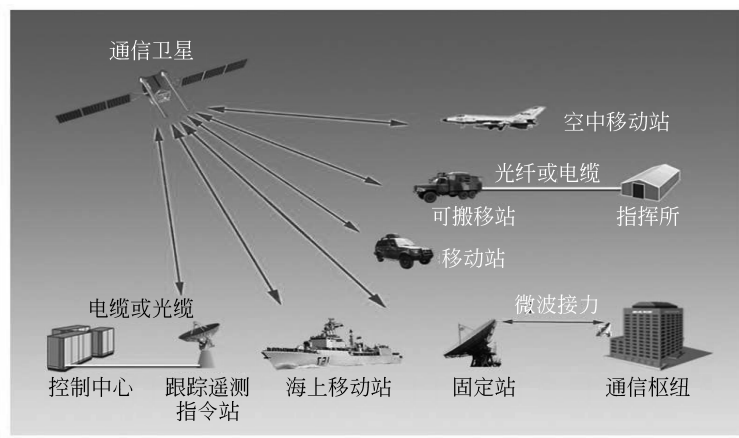


图 3-15 卫星通信示意图

(2) 应有较宽的频带,以便增大通信容量。

(3) 尽量避免与其他通信业务间的干扰。

(4) 充分利用和发挥现代通信与电子技术。因此,卫星通信的工作频段应选择在电波能穿越电离层的特高频或微波频段,它的最佳频段范围为 $1\sim 10\text{GHz}$ 。表 3-4 所示为 ITU-T 为卫星用户分配的工作频段。

表 3-4 ITU-T 为卫星用户分配的工作频段

频段	工作频率/GHz	上行链路/GHz	下行链路/GHz	带宽/MHz	存在问题
UHF	(L)1.5/1.6	1.6	1.5	15	频段窄,拥挤
SHF	(S)2/4	2.2	1.9	70	频段窄,拥挤
	(C)4/6	5.925~6.425	3.7~4.2	500	地面干扰
	(Ku)11,12/14	14~14.5	11.7~12.2	500	降雨
	(Ka)20/30	27.5~31.0	17.7~21.2	3500	降雨,设备成本

注:军用卫星通信的工作频率是:UHF 频段的 $250\text{MHz}/400\text{MHz}$;SHF 频段的 $(X)7\text{GHz}/8\text{GHz}$;EHF 频段的 $20\text{GHz}/44\text{GHz}$ 。

与其他无线传输相比,卫星通信具有以下特点。

(1) 传播时延长。图 3-16 表示地球同步卫星的配置。由于卫星离地面的高度为 $35\,860\sim 41\,755\text{km}$,因此从一个地球站经卫星到另一个地球站的电波传播距离为 $71\,720\sim 83\,510\text{km}$ 。其传播时间需 $240\sim 280\text{ms}$ (一般取 270ms)。传播时延长是卫星通信的一个突出问题,必须给予足够的重视。

(2) 传播损耗大。卫星微波主要是在大气层以外的自由空间中传播的,自由空间的传播损耗要比大气层的损耗大得多,可达 200dB 左右。

(3) 受大气层的影响大。由于电波需穿越大气层,会受到大气层中自由电子和离子的吸收,受到对流层中氧分子、水蒸气分子和云、雾、雨、雪等的吸收和散射,从而引起损耗。这种损耗与电波频率、波束仰角,以及气候条件有密切关系。

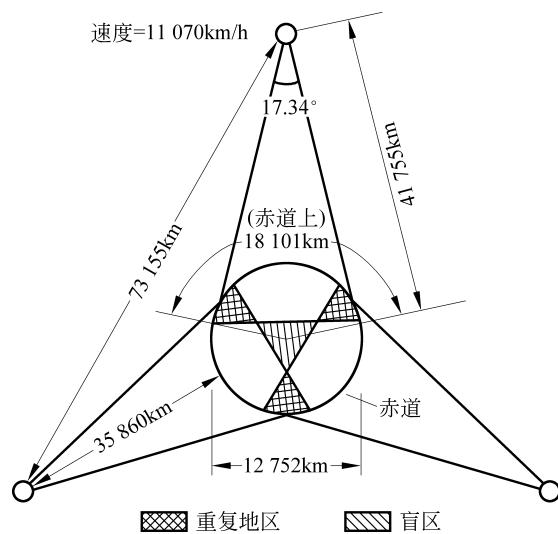


图 3-16 地球同步卫星的配置

(4) “面覆盖”式的传播信道。当采用全球波束天线时,可覆盖地球表面三分之一的区域。即使采用点波束天线,也可覆盖相当大的地域。由于覆盖面积大,便于在大区域内实现多址通信和移动通信。卫星通信的广播工作方式,也有利于构成卫星通信网,实现全网控制和进行闭环测试。

卫星通信具有覆盖地域广、传输距离远、通信容量大、传输质量好、建站费用与距离无关等优点,但也带来了若干新的技术问题,诸如需要得到高新技术(空间、电子)的支持、传播时延过大的影响、设备可靠性要求很高,以及通信保密性较差等。由于卫星通信适用于多种通信业务,已在各种通信及广播电视等领域得到广泛的应用。

3.3.7 散射传输

散射通信(Scatter Communications)是指利用大气层中传输媒体的不均匀性对无线电波的散射作用进行的超视距通信。它是通信领域在 20 世纪 50 年代最突出的成就之一。利用散射通信,一些被高山、湖泊等障碍物阻隔数百千米的用户之间可实现超视距通信,这一特点极适合军事应用,并得到了迅速发展。散射通信包括对流层散射通信(Troposcatter Communication)、电离层散射通信(Ionospheric Scatter Communication)和流星余迹散射通信(Meteor Burst Communications),而最广泛使用的是对流层散射通信,一般如无特别指明,散射通信是指对流层散射通信。限于篇幅,下面只对对流层散射通信进行扼要介绍。

对流层是指从地球表面至高度为 18km 的气体最稠密的大气空间。对流层的高度在不同的纬度地区有所不同,在中纬度地区为 10~12km,而低(高)纬度地区较高(低)些。由于在对流层中存在着大量随机运动的不均匀介质——空气涡流、云团等,它们的温度、湿度和压强等与周围空气不同,因而对电波的折射率也不同。当无线电波照射到这些不均匀的介质时,就在每一个不均匀体上感应出电流。当旋涡的尺寸与入射无线电波的波长可比拟时,这些不均匀体就如同基本偶极子天线那样成为一个个的二次辐射体,从而将入射无线电波

的能量再次向各个方向发出该频率的二次辐射波,这就是散射现象。简言之,对流层散射通信就是利用对流层大气结构的不均匀性来实现的超视距无线电通信。利用对流层散射进行通信的频率范围主要在 $100\sim 4000\text{MHz}$ 。按照对流层高度的估算,可达到最大有效散射距离约为 600km 。图 3-17 是对流层散射通信示意图(注:对流层内的散射体是空气涡流和云团,而电离层内的散射体是流星余迹)。

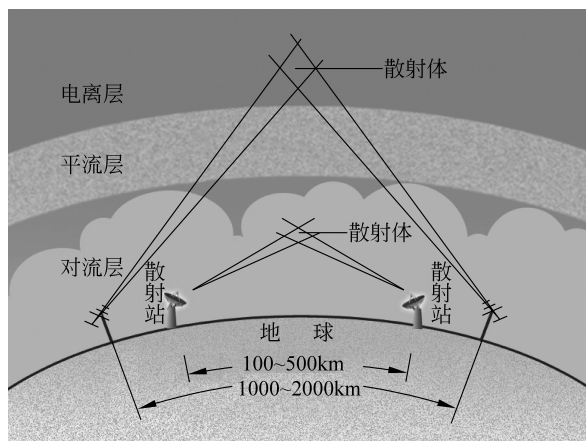


图 3-17 对流层散射通信示意图

由于二次辐射电波的方向是不均匀的,其大部分能量在电波通过的方向及其附近,而对流层散射通信系统的接收天线接收到的信号,是收/发天线波束相交部分散射体内媒体的前向散射信号之和。

对流层散射信道存在电波多径传播现象。由多径传播引起的衰落是快衰落。实际上,除快衰落之外,由于气象条件的有规律变化(如昼夜、季节变化)和随机变化(如气流运动、大气风的影响等),都会使接收信号电平中值(或均方根值)存在较长的慢起伏,这是慢衰落。

对流层散射通信具有以下特点。

(1) 单跳通信距离较远,通常为 $100\sim 500\text{km}$ 。当散射体离地面高度为 10km ,且信号能量足够大时,传输距离可达 700km 以上。

(2) 通信容量大。作为中远距离通信,对流层散射通信容量比短波和流星余迹通信大得多。目前国际上已实现了 $2\times 8\text{Mb/s}$ 的传输速率。

(3) 抗干扰、抗截获能力强。因为散射通信天线的波束窄(通常只有 2° 左右),亦即只有在很小的覆盖地域宽度内才能接收到散射信号;散射通信都要采用多重频率分集采集接收、抗瞄准干扰和宽带信号处理等技术,这使得散射通信难以被监听和干扰。

(4) 通信保密好。采用方向性很强的抛物面天线,空间电波不易被截获和干扰;采用加密技术更提高了保密性。

(5) 抗核爆能力强。核爆后能很快恢复正常通信。通信可靠度一般可达 $99\%\sim 99.9\%$ 。

(6) “越障”能力强,机动性好。“越障”能力是指适合高山、峡谷、中小山区、丛林、沙漠、沼泽地、岸-岛等中间不适宜建微波接力站地段,均可使用移动散射通信设备进行通信。

(7) 抗毁能力强。天线虽大,但可架设在地面上加以伪装;在几百千米内不用中继,也