

通 信 系 统

哈尔滨工业大学

主编

张乃通 贾世楼

国防工业出版社

内 容 简 介

本书重点讲述了近代通信中的两种重要方式——短波单边带通信和卫星通信,对其他通信方式也作了适当的介绍。全书包括绪论及三篇。绪论主要介绍通信系统模型和电波传播的基本概念。第一篇短波单边带通信,重点讲述了短波信道特点以及系统性能指标、方案和工程设计考虑等。第二篇卫星通信,重点讲述了卫星通信系统的基本概念、多址联接方式、通信线路设计和地面站设备等。第三篇微波通信及其他通信方式,简要介绍了微波接力通信、散射通信、光通信和网通信等通信方式。

本书可作为高等院校无线电通信专业教材,也可作为从事无线电通信工作的工程技术人员参考书。

通 信 系 统

哈尔滨工业大学 主编
张乃通 贾世楼

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张15 347千字

1981年3月第一版 1981年3月第一次印刷 印数: 0,001—7,200册

统一书号: 15034·2162 定价: 1.55元

前 言

本教材系高等学校工科电子类无线电通信专业的统编教材之一。全教材的教学时数为80学时左右。

“通信系统”是无线电通信专业的最后一门必修课。它是通过前面学的专业基础课在“通信系统”课中的应用,来建立各种通信系统的概念,因而本课程不可能全面而具体地讨论各种通信系统的问题。本教材用点面结合的方法,重点介绍了短波单边带通信系统和卫星通信系统,而对微波通信、散射通信、光通信、网通信等通信系统只作适当的介绍。由于米波通信系统从其传播特点来说与微波通信基本一致,从设备特点来说与短波通信相近,因此本教材没有单独安排米波通信系统的章节。

本教材共包括绪论及三篇。绪论主要介绍通信系统模型及电波传播的基本概念。第一篇主要介绍短波信道的特点及短波单边带通信系统的性能指标、方案、工程设计考虑等。第二篇主要介绍以通信卫星为中继站的卫星通信系统的性能,包括卫星通信的基本概念、多址联接方式、卫星通信线路设计、地面站设备等。第三篇简要介绍微波接力通信、散射通信、光通信、网通信等。

本教材由哈尔滨工业大学张乃通、贾世楼同志主编,刘士生、徐世昌同志参加编写。绪论由张乃通同志编写,第一篇由张乃通、刘士生同志编写,第二篇由贾世楼同志编写,第三篇除第十三章由徐世昌同志编写外,其余均由张乃通同志编写。最后由张乃通同志总编。由成都电讯工程学院李乐民、洪福明同志主审。参加审稿会的还有西北电讯工程学院、华中工学院、成都电讯工程学院、南京通信兵学院等学校的有关老师,并提出了宝贵的意见。在最后定稿期间,哈尔滨工业大学无线电工程系的有关同志进行了审阅,并提出了宝贵的意见,在此一并感谢。

由于编者水平不高,经验不足,内容谬误之处在所难免,请读者多批评指正。

编 者

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 通信系统概述	1
§ 1.2 电波传播的基本概念	7

第一篇 短波单边带通信系统

第二章 短波信道	17
§ 2.1 短波传播的特点	17
§ 2.2 短波电道的计算	20
第三章 单边带通信系统的组成	22
§ 3.1 单边带通信系统的组成	22
§ 3.2 对单边带通信系统频率稳定性的要求	26
§ 3.3 单边带通信机的分类	29
第四章 单边带通信系统的质量指标	31
§ 4.1 信号作用于非线性器件	31
§ 4.2 放大器的非线性失真对单边带收、发信机的影响	33
§ 4.3 混频器中所产生的非线性失真	37
§ 4.4 单边带发射机技术指标	39
§ 4.5 单边带接收机技术指标	42
第五章 单边带通信系统设计的考虑	48
§ 5.1 单边带信号产生方法	48
§ 5.2 中频的选择	51
§ 5.3 单边带接收机前端电路的考虑	54
§ 5.4 单边带发射机设计的考虑	59
§ 5.5 单边带收、发信机方案举例	61
第六章 短波信道传输数字信号的一些问题	65
§ 6.1 提高短波通信可靠性的可能性	65
§ 6.2 多普勒频移及多径效应对传输数字信号的影响	66
§ 6.3 提高短波通信可靠性的主要技术措施	69
附录 单边带通信机主要技术指标测试	74
§ 附-1 单边带发射机主要电指标的测量	74
§ 附-2 单边带接收机主要电指标的测量	78

第二篇 卫星通信

第七章 卫星通信概述	83
§ 7.1 卫星通信的基本概念	83
§ 7.2 卫星通信线路的组成	84

§ 7.3	卫星通信的特点	85
§ 7.4	通信卫星的组成和功能	88
§ 7.5	卫星通信中的电波传播特点	96
第八章	卫星通信多址联接方式	101
§ 8.1	概述	101
§ 8.2	多路复用和调制方式	101
§ 8.3	频分多址方式	108
§ 8.4	时分多址方式	118
§ 8.5	码分多址方式	131
§ 8.6	其他多址方式	133
第九章	卫星通信线路	135
§ 9.1	卫星通信线路标准	135
§ 9.2	卫星通信线路载波功率与噪声功率的计算	137
§ 9.3	地面站的设计考虑	144
§ 9.4	卫星通信线路设计	148
第十章	地面站设备	159
§ 10.1	地面站的组成及各部分功能	159
§ 10.2	天线系统	160
§ 10.3	大功率发射系统	163
§ 10.4	高灵敏接收系统	166

第三篇 微波中继通信、散射通信及其他

第十一章	微波中继通信	171
§ 11.1	微波中继通信系统概述	171
§ 11.2	频率复用设备	172
§ 11.3	时间复用设备	174
§ 11.4	时分复用微波中继系统设计的考虑	182
§ 11.5	数字微波通信的发展动向	185
第十二章	散射通信	188
§ 12.1	散射通信概述	188
§ 12.2	对流层散射信号的主要特性	189
§ 12.3	改善散射信道的主要技术措施	194
§ 12.4	电离层散射通信	201
§ 12.5	流星余迹通信	202
第十三章	光通信	204
§ 13.1	激光特点及激光器	204
§ 13.2	激光调制	205
§ 13.3	激光检测	207
§ 13.4	激光通信系统	211
§ 13.5	光导纤维通信	214
§ 13.6	激光卫星通信	222

第十四章 网通信	223
§ 14.1 综合业务通信网的构成	223
§ 14.2 计算机网	227
§ 14.3 移动通信电台组网	230
主要参考资料	233

第一章 绪 论

§ 1.1 通信系统概述

用任何方法，通过任何媒质将信息从一地传送到另一地，从广义上讲均可称为通信。随着社会的发展，为了适应远距离传送多种信息，如语言、文字、图片、数据等的要求，人们采用了用电信号通过电信道来传递信息的方式，这就是近代的通信系统。

按传送信息的媒质不同，通信可分为两大类：一类称为有线通信，它是利用导线来完成信息传递的一种通信方式；另一类称为无线电通信，它是利用无线电波在空间传播来完成信息传递的一种通信方式。

无论那种通信，都是为了完成信息的传递任务。因此，所有的通信系统都可以由图 1-1 加以概括。该图反映了通信系统的共性，一般称为通信系统模型。通常，根据我们研究的对象及关心的问题不同，还可以给出不同形式的较为具体的通信系统模型。

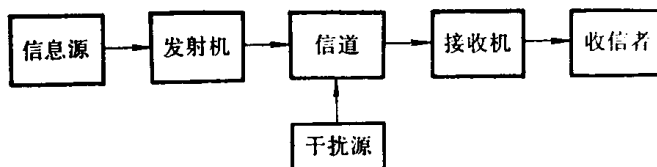


图1-1 通信系统的模型

1.1.1 无线电通信发展概况

十九世纪后期，人们经过多次反复实验，对电磁学的基本规律积累了丰富的感性认识，总结出三条经验规律，即库仑定律、安培定律和法拉第电磁感应定律。在这些实践经验的基础上，麦克斯韦把它们提高到理性认识，总结出四个方程，即麦克斯韦方程组，从理论上指出电磁波存在的可能性，并用数学的方法证明电磁波具有光波的性质。在这之后，有名的赫兹实验又从实验角度证实了电磁波的存在。随后不久，人们就开始利用电磁波进行无线电通信。从那时起到现在，无线电通信虽然只有八十多年的历史，但是它的发展却是惊人的。在通信距离方面，可以实现从几公里到几千公里甚至亿万公里的远距离通信；在传送信息种类方面，可以实现电报、电话、传真、雷达图象、电视节目、各种数据等多种信息的通信；在通信容量方面，一条线路可以同时传送几十路电视、几万路甚至是更多路数的电话。

从无线电通信的发展过程来看，现代无线电通信技术是随着对通信的可靠性和通信的速率不断提高要求而发展起来的。具体表现在扩展使用频率范围和寻找新的传输方式上。下面从这两方面来叙述它的发展过程和趋势。

无线电波的应用是从超长波开始的。主要是因为当时高频大功率电子管还没有问世，所以人们只能利用超长波进行通信。超长波的特点是：电波沿着地表面传播时衰减很小，此外，由于作为传输介质的地表面，其特性是基本不变的，因此，电波传播得比较远，而且相当稳定。但是超长波需要的设备很庞大，这是因为超长波的使用频率才数十千赫左右，若按

$\lambda/4$ 计算天线高度, 则要数千千米以上的天线, 这几乎是不可能实现的; 此外, 超长波的频段宽度有限, 所以能够容纳电台的数目也很少。由于这些缺点, 人们在解决了大功率管产生高频能量的问题以后, 就很自然地使用长波和中波来进行通信和广播。但是长、中波的频率仍比较低, 设备的体积和使用的天线还比较大, 频段内能容纳的电台数目还比较少, 因此, 进一步探索更高频段是必要的。1924年, 人们从实践中证明利用短波 (3~30MHz) 经过电离层反射进行环球通信是一种既经济又有效的方法。这样, 设备的体积缩小了, 天线的高度大大地降低了, 并且, 由于远程通信的定向辐射天线相继研究成功, 使传输的功率也节省下来了。因此, 在三十年代末期和四十年代初期就广泛地开始采用短波通信。五十年代, 随着电子器件 (如速调管、行波管等)、微波器件 (如铁氧体、波导器件)、固体器件 (如参量放大器) 等技术的发展, 无线电通信开始进入米波、分米波和厘米波波段。由于波长的缩短, 电波传播的特点就更像光波那样以直射、反射和散射为主。在进入这些频段后, 通信容量大大增加。同时由于这些频段宽阔, 从而促进了抗干扰性强的宽频带调制技术蓬勃发展, 调频得到广泛应用, 编码调制的应用正日益增多。到目前为止, 从长波一直到厘米波波段, 不论是制造通信设备的技术还是电波传播的理论和规律, 都已基本掌握, 并能比较圆满地解决稳定可靠的通信系统的设计问题。

在扩展频率范围上, 一方面不断地研究极长波方面的理论, 寻求他们的应用可能性, 另一方面现用的视距、超视距通信将使用 18~20MHz, 甚至更高频段, 目前正在研究的有毫米波、亚毫米波等通信技术。

在寻求新的传输方式中, 值得提出的是利用通信卫星作为中继站的卫星通信方式。它可以实现大容量、远距离和稳定可靠的通信。目前卫星通信已取代大部分国际短波通信的业务。另一个值得注意的是利用超长波作地下或海底通信, 对于军事上有很大价值。此外毫米波波段的表面波传输和波导传输也已有十几到几十公里的试验线路。

近年来随着激光技术的发展, 无线电通信的频段正逐渐向着无线电频谱范围以外的光谱发展。目前 0.4mm~0.76 μ m 的红外线频段, 0.76~0.4 μ m 的可见光频段, 和 0.04~0.006 μ m 的紫外线频段都已开始进行通信试验。这一频段的容量是惊人的。试验结果表明, 这个频段可以容纳一千万个波道, 利用相干光作载波在单位时间内可传送比无线电波多 $10^3 \sim 10^4$ 倍的信息量。

利用光波进行空间通信是有很意义的。目前光波在地面上作视距或超视距传播虽有一定的效果, 但尚有困难, 因为雾对光频率的吸收太严重。近几年来由于光导纤维技术取得了重大突破, 损耗为 0.3~0.5dB/km 的光纤制造成功 (1979 年水平), 折射率沿轴向渐变的光纤随之出现, 使得光导纤维的传输性能可与同轴电缆、微波系统等相媲美。如果终端再能用上集成光路, 可把通信容量提高到 10^{10} b/s 以上, 因此光导纤维通信将能为我们提供一种非常先进、非常有效和实用的通信系统。

在近代通信系统中, 点与点间的通信已不能满足要求, 往往需要进行多点之间的通信。这样, 就出现了如何快速转接与组成通信网的问题。通信网的问题是一个很复杂又很重要的问题。网的规划好坏直接影响到多快好省地交换信息的问题, 这无论在理论上还是在实践中都还在继续发展, 并成为当前研究工作的重要课题之一。

1.1.2 无线电通信系统概述

利用无线电信道传递信息的通信系统称为无线电通信系统。在这种系统内,信息源(也称发终端)的作用是把各种要传送的信息转换成电信号,这种电信号称为基带信号。为了使基带信号适应在信道中进行传输,由发送设备对基带信号完成某种变换,然后再送入信道。在接收端,接收设备的功能是与发送设备相反,它从接收信号中恢复出相应的基带信号,而收信者(也称收终端)将复原的基带信号转换成相应的信息。图 1-1 中的噪声源是信道中的噪声与干扰以及分散在通信系统其它各处的噪声的集中表示,这是为了便于分析问题。

一、信号

在无线电通信系统中,传输的信号一般有电报、电话、传真、电视、数据等。从它们的特点中可概括地分为离散信号和连续信号两种类型。

离散信号 在通信系统内传输的信号,其载荷信息的物理量(如电信号的幅度、频率、相位等)的改变,在时间上是离散的,这种信号就称为离散信号。如果不仅在时间上离散,而且取值也离散,则称之为数字信号。这时信号除了在时间上离散外,其幅度取值也是离散的。我们把传输数字信号的通信系统称为数字通信系统。

连续信号 在通信系统内传输的信号为时间的连续函数时,则这样的信号称为连续信号或模拟信号。我们把传输模拟信号的通信系统称为模拟通信系统。

模拟信号并非只能在模拟信道中进行传输,根据需要,也可先把模拟信号进行模/数转换,转换成数字信号,然后利用数字信道进行传输。此时,在收端再进行相反的数/模转换,以还原出模拟信号。

从频谱分析得知,无论是连续信号或是离散信号都可以分解成不同的频率分量,各频率分量间都有一定的幅度和相位关系。例如语言信号的有效频率范围为 $300 \sim 3400\text{Hz}$,其带宽约为 3kHz ,一般称这样的语言频带为一个基本频带。慢速电报,每秒发出 50 个电码(符号),其主要频谱集中在 $0 \sim 50\text{Hz}$ 范围。电报的速度越快,单位时间传送的码元越多,码元的宽度就越窄,因而信号所占据的频带就越宽。电视信号传送的是画面变化很快的图象,因此,电视信号所占的频带就很宽,大约是 $0 \sim 6\text{MHz}$ (或 $0 \sim 8\text{MHz}$)。

二、信道

信道是指传输信息的媒质,或通道。无线电信道是携带信息的无线电信号在空间传播的通道。本书所述的信道,不是指某个信息的通道,而是指信号的通道。其范围是从发送设备到接收设备之间的传输媒质。在无线通信的情况下,也不包括天线。所以这样作是为了强调在传输过程中传输媒质对信号的影响,而暂时不讨论信号通过发、收设备的高频部分时所发生的变化。无线电波在空间传播的性能和大气结构、高空电离层的结构、大地的衰减作用以及电波的频率、所取的途径……都有密切的关系。一般地说,不同波段的电波在传播时所取的途径以及它受到上列不同因素的影响也不同。

无线电波段的划分如表 1.1 所示。

下面介绍信道的分类及信道容量与传输信息间的关系。

1. 信道分类

表1.1 无线电波频段的划分

波段名称		频率范围	波长范围	频段名称
超长波		30~3 kHz	$10 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3 \text{ m}$	甚低频 VLF
长波		300~30 kHz	$1 \times 10^3 \sim 10 \times 10^3 \text{ m}$	低频 LF
中波		1500~300 kHz	$200 \sim 1 \times 10^3 \text{ m}$	中频 MF
短波	中短波	$6 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^3 \text{ kHz}$	50~200 m	中高频 IF
	短波	30~6 MHz	10~50 m	高频 HF
超短波	米波	300~30 MHz	1~10 m	甚高频 VHF
	分米波 ^①	$3 \times 10^3 \sim 300 \text{ MHz}$	10~100 cm	特高频 UHF
微波	厘米波	$30 \times 10^3 \sim 3 \times 10^3 \text{ MHz}$	1~10 cm	超高频 SHF
	毫米波	$300 \times 10^3 \sim 30 \times 10^3 \text{ MHz}$	1~10 mm	极高频 EHF
激光		10 ⁶ MHz 以上	$3 \times 10^{-4} \text{ m}$ 以下	

① 也有将分米波的高端称为微波的。

现代无线电通信系统的典型信道有：（1）中长波地表波传播信道；（2）超短波及微波视距传播信道；（3）短波电离层反射信道；（4）超短波流星余迹散射信道；（5）超短波及微波对流层散射信道；（6）超短波电离层散射信道；（7）超视距绕射信道；（8）人造卫星中继信道等。这八种信道各有其特点，下节将作具体介绍。下面我们简要地介绍这些信道所具有的共性：

（1）所有信道皆有输入端，各种形式输入信号的功率可以向其馈入。并且所有信道皆有输出端，从那里可以接收到功率。也就是说，它们具有一（多）个输入端及一（多）个输出端。

（2）观察表明，绝大部分信道可以认为是线性的。

（3）即使信道没有输入，在信道输出端也存在一定的功率（即加性干扰）。

（4）通过信道传输的信号需要一个有限的传输时间，并且以不同方式受到衰减。它可以是简单的固定损耗，也可以是复杂的时变损耗。也就是说，信号通过信道后有时延与损耗。

这些特性说明，能够用二对端子或多对端子的时变线性网络来表述各种类型的信道。用这种模型可以确定信道对传输信号的影响。图 1-2 示出了最简单的与四端网络等效的信

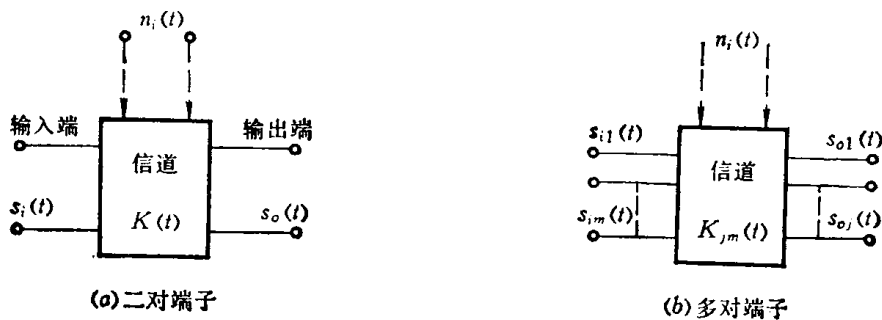


图1-2 信道等效的四端网络

道。输入信号一般可表示为 $s_i(t)$ ，输出信号可表示为 $s_o(t)$ 。这样，输入输出的关系可由式 (1.1) 确定：

$$s_o(t) = K(t) \times s_i(t) \quad (1.1)$$

式中 $K(t)$ 为信道特性所决定的函数。根据 $K(t)$ 的性质，可以把各种信道大致划分为两大类：

(1) 恒参信道 如果信道参数不随时间变化，即在相当长的时间中 $K(t)$ 基本上不变，这种信道就称为恒参信道，又叫时不变信道。前面列举的八种信道中，前两种和第八种大致可归属恒参信道。对于这类恒参信道已有比较成熟的数学分析方法（在通信原理课中已有介绍）。

(2) 变参信道 函数 $K(t)$ 与时间 t 有密切关系的信道，或者说，信道特性随时间而变化的信道，称为变参信道，又叫时变信道。前面列举的八种信道中，除第 1、2、8 种外，其余几种大致上都归属变参信道类。这种信道的具体特点是：传输衰减不稳定，有慢衰落现象；传输迟延不稳定，产生所谓多普勒频移；由于多径传输在接收端叠加的结果造成快衰落和频率选择性衰落，这就是所谓多径效应。对于这种变参信道目前还没有建立较完善的数学模型，人们研究得还不够深透。我们将在介绍短波信道及散射信道时作定性的叙述。

2. 信道容量与传输信息间关系

由高斯噪声信道容量的山农公式可知，如果信道低通有限带宽为 Δf ，单边功率谱密度为 n_0 的噪声功率为 $N = n_0 \Delta f$ ，信号功率为 s ，则通过这种信道无错误地传输信息的最大二进制速率，就称为信道容量 c ，且 $c = B \log_2 \left(1 + \frac{s}{N} \right)$ b/s。随着使用载波频率的不同，信道的带宽将有不同。而信道容量与信道带宽的关系最大，带宽愈宽，同时容纳基带信号的数目就愈大，在信噪比不变的情况下，信道容量也就愈大。载波频率愈高，信道带宽就愈宽。例如长波的信道带宽是：

$$\Delta f = 300 \text{ kHz} - 30 \text{ kHz} = 270 \text{ kHz}$$

而厘米波的信道带宽则是

$$\Delta f = 3 \times 10^4 \text{ MHz} - 3 \times 10^3 \text{ MHz} = 2.7 \times 10^4 \text{ MHz}$$

因此，厘米波信道带宽将是长波信道带宽的 10^5 倍。

长波的频率较低，信道带宽小，所以信道容量也小，难于进行宽带通信。

短波的频率较高，带宽也相应地增加，所以信道的容量较大。目前使用的国际短波单边带通信系统，一般地能同时通四个话路。

米波和微波的频率更高，所以信道的带宽更宽，尤其是微波，信道的容量更大。通常，微波接力通信的信道带宽可达数十兆赫，故可同时传数百路以上的电话信号。

由此可见，不断提高载频频率就可相应地增加信道的通信容量以适应日益繁忙的通信要求。IS IV 号国际卫星通信系统的信道带宽为 500 MHz，能同时转发来自数十个国家的多路电报、电话和电视信号，但仍然不能满足更多国家进行通信的需要，因此，就需有更高频段的卫星通信以适应传送更大量信息的要求。

三、干扰

电波在信道传输的过程中还会受到各种各样的干扰。当考虑图 1-2 中以虚线表示的干扰 $n_i(t)$ 时, 式 (1.1) 改为:

$$s_o(t) = K(t)s_i(t) + n_i(t) \quad (1.2)$$

式中 $K(t)$ 与 $n_i(t)$ 都是信道特性所决定的。一般情况下, 它们都是随机函数。可以认为 $K(t)$ 表示信道产生乘性干扰的一个乘性因子, 而 $n_i(t)$ 为加性干扰。

1. 加性干扰 这种干扰是和信号叠加在一起的。然而在干扰作用下, 信号本身并没有新的频率分量产生, 而且各个分量的振幅、相位关系都没有发生变化。产生加性干扰的原因很多。属于信道外的有接收机及发射机的内部噪声, 而属于信道中的有天电干扰、宇宙天体的辐射干扰, 以及人为干扰和其它电台的干扰。此外日益发展的各种电磁设备也是不可忽略的加性干扰来源。这些干扰在频谱结构上是复杂的。为了便于分析, 一般可分为: 高斯噪声, 如接收机内部噪声、天线热噪声以及宇宙辐射等; 脉冲干扰, 如闪电、电火花、某些人为干扰等; 其它电台的干扰, 往往又称正弦干扰。

这种干扰虽然不破坏原来的信号, 但它伴随信号而来, 又覆盖极宽的频谱, 因此对通信系统的影响是必须考虑的。

2. 乘性干扰 如式 (1.2) 中第一项所示, 它使信道中的输出信号可能与输入信号不同, 而是输入信号与信道传递函数的乘积。习惯上将传递函数的时间变化分成两个分量, 一个描述长期变化, 另一个描述短期变化。划分为这样两项, 是为了简化系统设计的缘故。一般说来, 长期变化发生在所关心频段中的所有频率上, 并且对于间隔几百个波长位置上接收到的信号影响相同。例如, 接收信号强度的日变化和年变化为长期的。长期变化通常与传播条件的变化有关, 如由于昼夜间电离层的不同或自夏季至冬季对流层的温度和湿度不同产生的变化。短期乘性干扰一般与电路中各种形式的多径传播的改变有关。除了在特定频率上产生信号强度的快速起伏以外, 这些变化还引起频率选择性衰落, 即在不同频率上不相关的衰落, 并且在时域中它们能引起短脉冲失真。

上面我们介绍了单输入端与单输出端信道的情况, 实际上我们将遇到更复杂的信道。这些更复杂的信道可以有一对或多对输入端及一对或多对输出端。图 1-2(b) 用符号表示出这样一个信道, 描述通过这样信道的传输方程如式 (1.3) 所示

$$s_{oj}(t) = \sum_{m=1}^k K_{jm}(t)s_{im}(t) + n_{ij}(t) \quad (1.3)$$

$$(j = 1, 2, \dots, n)$$

式中 $s_{oj}(t)$, $s_{im}(t)$ 分别为信道第 j 个输出端和第 m 个输入端上的信号。式 (1.3) 指的是具有 k 个输入端对和 n 个输出端对的多对端子系统。在进一步分析时, 一般需用一个单独的函数去描述每一输出端与输入端间的关系。此外, 在每一输出端还需加进单独的加性干扰。

四、发射机与接收机

图 1-1 所示通信系统中, 其发射机与接收机的作用主要是对信号波形进行变换、放大, 并将信号送入信道, 或从信道中取出信号。发射机一般可概括为载波发生器、调制器和天线三部分。接收机一般可概括为接收天线、选择性放大器和解调器三部分。本书不具体介

绍发射机和接收机。只在下面第一篇中介绍有关单边带发射机、接收机的指标、方案的论证等。

§ 1.2 电波传播的基本概念

电波从它离开发射天线以后，便决定于周围介质。因此在地球范围内的通信，必须知道这个天体的电磁特性，即地面、地下、大气层以及地球自身的磁场和宇宙其它部分对它的影响。电波既然是电磁波，那么它就必须遵循电磁波运动的规律。但由于地球的电磁特性相当复杂，想要严格地处理电波传播问题，几乎是不可能的，因此只好采用半经验半理论的方法。首先在理论上解决一部分问题，而更重要的还得依靠实验，这是研究电波传播的主要特点。

在均匀无限大介质中传播的平面波，如果介质是无耗的，那么它的强度不会减弱，而相位则随着路径的增加而不断延迟，可以写作 $e^{-j\alpha r}$ (α 是相位常数， r 是在射线方向上的距离)。如果不是平面波，就是在均匀无限大介质中传播，也不遵循上述规律。通常，总是把发射出来的电波，视为球面波的一部分，球心则位于发射天线。这时，电波的场强将随 r 的增加而减少，其相位则是线性的滞后。研究点的场强可表示为 $\frac{1}{r} e^{-j\alpha r}$ 。当周围的介质还有损耗时，则介质还要额外地吸收电波的能量，使场强的衰减来得更大，这时一般的场强表示式可写成 $A \cdot \frac{1}{r} e^{-j\alpha r}$ 。 A 称为衰减系数，在处理不同性质的电波传播问题时，它有不同的数值。

实际上介质是不均匀的，这样，电波在不同介质分界面上必然产生折射和反射。对于平面、球面、柱面等分界清楚的面就形成反射。在不规则的界面上，如高低不平的地面、天空的积云、大气中的湍流及电离层中的不均匀性等等，电波的反射是杂乱无章的漫反射，称为散射。此外，电波还会绕过障碍而传播到视线以外的空间，称为绕射。因此，电波的传播形式，可概括为：直射、反射（或散射）和绕射。这样，电波传播的路径基本如图 1-3 所示。沿路径①经大地表面传播的电波称为地表波；沿路径②从发射天线发射后直接到达接收天线的电波称为直射波；沿路径③经地面或附近其它物体反射的电波称为大地反射波。接收台 A 通常接收的是直射波和大地反射波的合成电波，人们一般称该合成波为直射波或视距波。地表波、直射波、大地反射波统称为地面波。与此对应，沿路径④经电离层反射传播的电波称为电离层波。另外，还有散射波、绕射波。

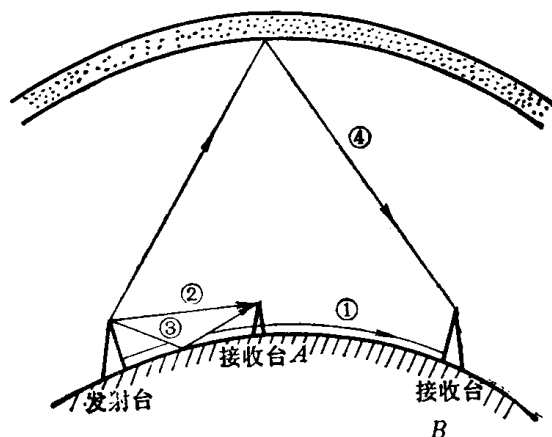


图1-3 电波传播路径

地面波的传播特性不仅受大地特性的影响，还与天线架设高度及传播距离有关。对于陆地而言，天线高度为一倍波长时就可忽略地表波的作用。对于海面而言，天线高度大于 5~10 个波长时地表波的作用就可忽略。收、发天线都应同时满足该要求。所以在波长较长的中长波波段，必须考虑用地表波传输，因为此时天线不易满足上述要求。对于微波波

段, 就可以忽略地表波的影响, 因为此时天线架设高度易于满足上述要求。对于短波波段, 在传播距离较近时 (一般不超过几十公里) 就靠地面波传播。

下面简要介绍地表波、电离层波、视距波等的传播特性。

1.2.1 地表波

沿大地表面传播的波称为地表波, 它是沿着地壳表面及大气底层的介面间传播的, 由架设较低的天线产生。由于地表的特性有利于长、中波段上的表面波传播, 因此地表波适用于长、中波段。地表波传播的特点是在波的行进过程中, 其能量与地面的导电系数 σ 和相对介电系数 ϵ' 有关, 在一般范围内, σ 与 ϵ' 愈大, 则电波传播的衰耗愈小。

对于地表波, 在接收点的电场强度可写成

$$E_g = E \cdot A \quad (1.4)$$

式中, E 是不计地面损耗时的场强; A 称为衰减因子, 它与地表的电特性有关, 一般地说 σ 与 ϵ' 愈大, 则电波的衰减愈小, 即 A 愈大。

下面首先介绍 E 的计算方法。

一、根据辐射功率及传播距离计算

假设点源天线的发射功率为 P , 将天线置于自由空间时, 在与天线相距 r 处的场强[●]为:

$$E_0 = \frac{245}{r} \sqrt{P} \quad (1.5)$$

对于以点源天线为参考标准的、方向系数为 D 的天线, 其在最大辐射方向上产生的场强为:

$$E = \sqrt{D} E_0 = \frac{245}{r} \sqrt{PD} \quad (1.6)$$

上两式中, P 的单位为 kW, r 的单位为 km 时, E 的单位是 mV/m; P 的单位是 W, r 的单位是 m 时, E 的单位是 V/m。

二、根据天线的底端电流 I_a 与实效高度 h_e 计算

如图 1-4 所示, I (实线) 代表天线上实际的电流分布情况, 天线顶端电流为 0; I_a 为天线底端电流; h_e 为天线的实效高度, 其意义是: 当天线以其底端 (馈电点) 电流的大小均匀分布于这一实效高度时, 这一假想的元天线能在垂直于天线轴的方向产生与实际天线相等的电场。

由图 1-4 的定义求得元天线的电场强度为:

$$E = \frac{120 \pi I_a h_e}{\lambda r} \quad (1.7)$$

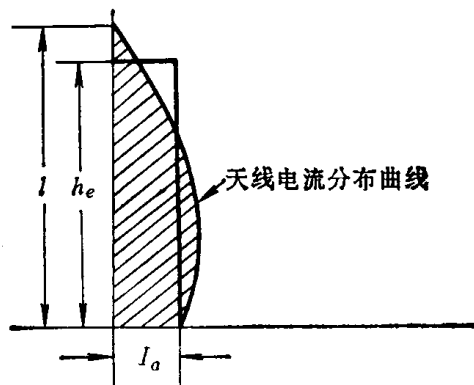


图 1-4 天线的实效高度

● 本章关于电波传播公式的推导见参考书[4]。

式中, I_a 的单位是 A, h_e 、 λ 、 r 的单位是 m 时, 则 E 的单位是 V/m。

其次, 计算式 (1.4) 中的 A 。

在计算 A 时必须知道土壤的电特性参数 σ 和 ϵ' 。一般进行分析时是假定地面为平滑的, 而且具有均匀的介电系数与导电系数。地面是否看成平滑视无线电电波的波长及真实的地面情况而决定。对长波来说, 除了高山外, 均可将地面看成是平滑的; 反之, 对于分米波或厘米波来说, 即使是海面上的小波浪或是田野中的植物也可否定地面的平滑性。

各种形式地面的 ϵ' 及 σ 值如表 1.2 所示。

表1.2 各种形式地面的电特性参数

表面的形式	变 化 的 范 围		平 均 值	
	ϵ'	$\sigma \left(\frac{1}{\Omega \cdot \text{m}} \right)$	ϵ'	$\sigma \left(\frac{1}{\Omega \cdot \text{m}} \right)$
海 水	80	1 ~ 4.3	80	4
河道和湖沼的淡水	80	$10^{-3} \sim 2.4 \times 10^{-2}$	80	10^{-3}
湿 土	10 ~ 30	$3 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-2}$	10	10^{-2}
干 土	3 ~ 4	$1.1 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-3}$	4	10^{-3}

A 的表示式为:

$$A \approx \frac{2 + 0.3 \rho}{2 + \rho + 0.6 \rho^2} \quad (\text{在 } \rho \geq 2 \text{ 时较准确}) \quad (1.8)$$

$$\text{式中} \quad \rho \approx 10^3 \left(\frac{\pi r}{\lambda} \right)^2 \sqrt{\frac{(\epsilon' - 1)^2 + (60 \sigma \lambda)^2}{\epsilon'^2 + (60 \sigma \lambda)^2}} \quad (1.9)$$

其中, 波长 λ 的单位是 m; 地面导电系数的单位是 $\frac{1}{\Omega \cdot \text{m}}$; ϵ' 及 A 无量纲。

由式(1.8)及式(1.9)看出, λ 越小, A 就越小, 则接收点场强 E_g 就越小。所以地表波宜用于较长的波段, 一般在长、中波及短波段低端应用。同时由于地表的电特性较稳定, 因此地表波的传输特性也较稳定。为了提高通信质量, 选择干扰较小的地区架设天线是应考虑的因素之一。但长、中波发射机及其天线的体积都非常大, 波段宽度窄, 这就限制了它的应用范围。

1.2.2 电离层波

一、电离层的形成

从地球表面到其上约 15km 之间, 由于地热的逐渐减小, 气压与温度逐渐随着高度而减低。在这个区间(或称在这一层)约集中了地面大气层所有气体全部质量的 75%。因温差产生对流, 所有的气象变化都在这层发生, 有风暴, 且有水蒸汽形成的雾云在移动。这层称为对流层。

在对流层以上气压急剧下降, 距 60km 左右高度时, 气压已经很低, 使气体分子之间的距离较在地面附近时大得很多。这时质量较重的气体在大气层的下面, 较轻的气体在大气层的上面。由于太阳表面具有约 6000°C 的温度, 它所辐射出来的电磁波有很宽的频带, 其波长短于 1000 Å 的部分(约为太阳全部辐射能量的 9.6×10^{-8} 倍), 使大气中气体游离而形成较稳定的电离状态, 即电离为带正电的离子和带负电的自由电子。电离过程使大气复

杂起来, 计有氮分子 N_2 、氧分子 O_2 、氮原子 N 、氧原子 O , 还有它们的离子和自由电子等成分。它们各自较集中地聚在一起形成层状, 致使天空中的电子浓度也相对集中形成层状。较显著的称为 D 、 E 、 F_1 、 F_2 层, 而又以 E 及 F_2 层更为显著。如图 1-5 所示。所谓电子浓度 (用 N_e 表示) 是指在单位体积内空气中所含的自由电子数, 它的大小随高度而改变。同时因电离层的构成是因为太阳的辐射, 所以一年四季以致每日 24 小时, 由于太阳照射的强弱发生变化, 各地电离层的情况也随时变化, 这样在各种情况下一个中纬度地区的 N_e 的统计值约如表 1.3 所示。

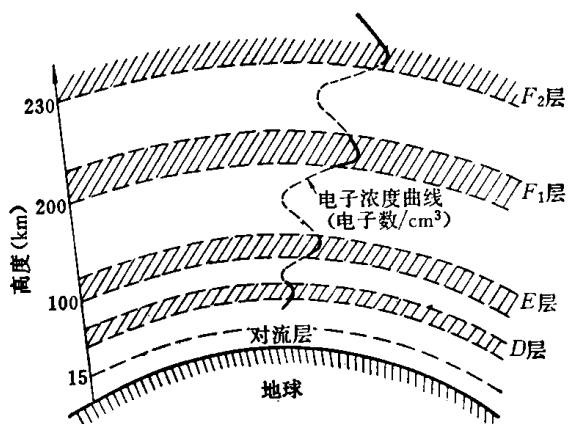


图1-5 地面上大气层的结构概况

表1.3 各电离层的高度及电子浓度

层名	离开地面的高度 (km)	N_e (电子数/ cm^3)	备 注
D	60~80	10^3	夜间消失
E	100~120	$5 \times 10^3 \sim 10^5$	N_e 白昼大、夜间小
F_1	200	4×10^5	夜间消失常出现于夏季
F_2	250~400	$10^5 \sim 2 \times 10^6$	N_e 白昼大、夜间小, 冬季大、夏季小

D 、 E 、 F_1 、 F_2 等就是天空电离层, 它们在反射 (或吸收) 电波上起着重要的作用。

二、天空电离层对电波传播的影响

当大气电离而形成电离层后, 其电参数就发生了变化。因为在电离层中有自由电子及离子存在, 当电波通过电离层时, 它们受到电波电场的作用而运动, 产生徙动电流, 使电波的电场与磁场的关系发生改变, 也即相当于介电常数发生改变。

设电波的电场随时间作正弦变化, 并假设电子运动的方向是 z 的方向, 并忽略电子运动时的碰撞, 经过运算得到电离层的等效介电系数为:

$$\epsilon_e = \epsilon_0 - \frac{N_e e^2}{m \omega^2}$$

其相对值为

$$\epsilon'_e = 1 - \frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m \omega^2} \quad (1.10)$$

式中, e 为电子电荷, 其数值为 $1.62 \times 10^{-19} C$; m 为电子质量, 其数值为 $9.106 \times 10^{-31} kg$; ϵ_0 为真空中的介电系数, 其数值为 $\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} F/m$; $\omega = 2\pi f$ 。

将上述各具体数值代入式(1.10)并化简, 得到

$$\epsilon'_e = 1 - 81 \frac{N_e}{f^2} \quad (1.11)$$

式(1.10)中 N_e 的单位是自由电子数/ m^3 , f 的单位是 Hz 。若 N_e 的单位是自由电子数/ cm^3 , 则 f 的单位是 kHz 。

由式 (1.11) 可知, 电离层的等效介电系数 ϵ'_e 较真空为小, 其值总是小于 1。 N_e 愈

大, f 愈小, 则 ε'_e 愈小。

在电离层中, 除了自由电子外, 还有中性分子和离子, 它们都处在不规则的热运动中。当电波入射到电离层后, 电波使自由电子作强迫振动, 电子与其它粒子碰撞时, 把振动能量转化为其它粒子的热运动能量, 因此, 电波就会有衰减, 这种现象称为电离层吸收。 N_e 愈大, 电波受到的吸收愈大; 频率愈高, 电子运动方向改变频繁, 受电场单方向加速的时间短, 运动速度低, 碰撞所消耗的能量小, 电波所受吸收小。至于碰撞次数 γ 的影响为: 当 $\omega^2 \gg \gamma^2$, 碰撞次数 γ 愈大, 能量损耗愈大, 电波所受吸收愈大; 而当 $\omega^2 \ll \gamma^2$ 时, γ 愈大, 吸收反而减小, 这是因为碰撞次数过于频繁, 电子加速不起来的缘故。

由于电离层的电子浓度随高度而变, 其等效电参数也随高度而变, 因此进入电离层的无线电波将不沿直线传播而产生连续折射。据物理分析得知, 物质的折射系数 $n = \sqrt{\varepsilon'}$ 。对于电离层, 其折射系数为:

$$n_e = \sqrt{\varepsilon'_e} = \sqrt{1 - 81 \frac{N_e}{f^2}} \quad (1.12)$$

为了便于分析, 我们假定电离层是由无数厚度极薄的平行薄层构成, 如图 1-6 所示 (图中 R_0 为地球半径)。在每一薄层中电子浓度假定是均匀的, 则由式 (1.12) 可知, N_e 随高度增加时, 则 n_e 减小, 因此, 电波在通过每一薄片层时折射一次。当薄片层的数目无限增多时, 则电波的轨迹变成一条光滑的曲线。

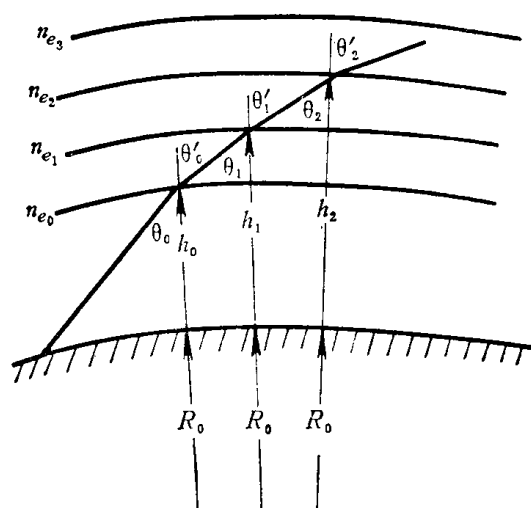


图 1-6 在电离层内电波的折射

由图 1-6, 根据折射定理, 可得:

$$n_{e0} \sin \theta_0 = n_{e1} \sin \theta_1 = n_{e2} \sin \theta_2 = \dots = n_{en} \sin \theta_n \quad (1.13)$$

式中, $n_{e0} = 1$, $n_{e1} = \sqrt{\varepsilon'_{e1}}$, $\dots$, $n_{en} = \sqrt{\varepsilon'_{en}}$ 是各层的折射系数; ε'_{e1} , ε'_{e2} , $\dots$, ε'_{en} 是各层电离层的相对折射系数; θ_0 , θ_1 , $\dots$, θ_n ; θ'_0 , θ'_1 , $\dots$, θ'_n 是各层的入射角和折射角。

由式 (1.13) 可看出, 随着电波深入电离层时, N_e 增加, n_e 减小, 入射角逐渐增加。当电波深入到电离层中某一高度时, N_e 的值大到使 θ_n 等于 90° , 这时电波的轨迹到达最大点, 并产生全反射。故电波在电离层中产生全反射的条件为:

$$\sin \theta_0 = n_{en} = \sqrt{1 - 81 \frac{N_{en}}{f^2}} \quad (1.14)$$

式 (1.14) 表示电波能由电离层反射回来, 及电波频率、入射角和电波反射点的 N_e 之间应有的关系。分析式 (1.14) 可得出:

(1) 当频率为 f 的电波以一定的入射角 θ_0 进入电离层时, 一直要深入到电离层的 N_e 满足式 (1.14) 所要求的数值时, 才能由该点反射回来。若电离层的最大电子浓度 $N_{e_{max}}$ 尚不能满足式 (1.14) 所要求的数值, 则电波穿出电离层而不能反射。

(2) 对于 f 一定的电波, 入射角 θ_0 愈小, 使电波反射所需的 N_e 应愈大, 因此电波将愈深入电离层。在垂直投射时, 电波深入电离层最深, 最不易反射。