



全国高校教材学术著作出版审定委员会审定

高频 电子线路

GAOPIN DIANZI XIANLU

主 编 万国峰 王建华 马安仁

副主编 文 茜 刘洪涛



国防工业出版社

National Defense Industry Press

全国高校教材学术著作出版审定委员会

高频电子线路

主 编 万国峰 王建华 马安仁
副主编 文 茜 刘洪涛

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

高频电子线路是电子与通信技术专业的一门重要基础课程,全书系统地介绍了无线通信系统主要单元电路的组成与工作原理。本书的主要内容包括高频小信号放大器、高频功率放大器、正弦波振荡器、振幅调制与解调、角度调制与解调及反馈控制电路。本书强调基本概念,注重实际应用,每章后都有难度适当的习题,利于学生提高解题能力。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路 / 万国峰, 王建华, 马安仁主编. —北京:
国防工业出版社, 2014. 11

ISBN 978-7-118-09832-7

I. ①高… II. ①万… ②王… ③马… III. ①高频—电子电路 IV. ①TN710. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 259596 号



※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 410 千字

2014 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

前 言

高频电子线路是电子与通信技术专业的重要技术基础课程，是一门理论性、工程性与实践性很强的课程，它内容丰富，应用广泛，相关新技术、新器件发展迅速。结合应用型本科人才培养的实际情况，本书注重实际需要，进一步厘清高频电子线路的基本内容，兼顾现代发展，内容组织上注重内在概念和分析思路的连贯性，可为学生的后续学习打好基础，达到培养应用型学生的目的。

本书的选材与组织遵循“系统功能为纲，优选基础内容，兼顾现代发展，注重概念连贯，便于组织教学”的原则，以无线通信系统各单元电路的“功能”为基点构筑各章节内容，精选基础内容适应有限学时，上下衔接保持内在思路的流畅，从而利于教学。从通信功能电路的输入信号频谱与输出信号频谱的变换关系出发，在理论上讲清楚各个通信功能电路的基本原理和实现电路的基本方法。内容以模拟通信功能电路为主，着重强调基本概念、基本单元电路的分析及其应用。

全书共分 8 章，具体如下：

第 1 章绪论，主要介绍电磁波频段的划分与应用、无线通信系统的组成、调制与解调的基本概念等。

第 2 章基础知识，主要介绍选频网络与阻抗变换电路和非线性电路的基本分析方法，以及模拟乘法器、变频器等单元器件的工作原理。

第 3 章高频小信号放大器，主要介绍高频小信号放大器的基本工作原理和电路等效方式、放大器稳定性分析、集成电路放大器。

第 4 章高频功率放大器，主要介绍丙类谐振功率放大器的工作原理和动态特性分析、高效（D、E 类）功率放大器概念、谐振功率放大器馈电和匹配电路、集成高频功率放大电路。

第 5 章正弦波振荡器，主要介绍反馈型自激振荡的工作原理、LC 正弦波振荡器、晶体振荡器。

第 6 章振幅调制与解调，主要介绍振幅调制的基本原理、振幅调制与检波电路。

第7章角度调制与解调，主要介绍调角信号的基本特性、调频与鉴频电路。

第8章反馈控制电路，主要介绍自动增益控制电路、自动频率控制电路、锁相环路、集成锁相环与应用。

本书由万国峰任主编。具体分工是：万国峰负责大纲制定及全书的审稿和统稿，王建华编写第1、2、4、5章，马安仁编写第2、5、7章，文茜编写第4、5、6章，刘洪涛编写第3、7、8章。

由于时间仓促及作者水平有限，书中难免存在错误及疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 绪论	1
1.1 无线通信系统概述	1
1.1.1 无线通信系统的组成	1
1.1.2 无线通信系统的类型	3
1.2 无线电信号与调制	4
1.2.1 时间特性	6
1.2.2 频谱特性	6
1.2.3 传播特性	7
1.2.4 调制特性	8
1.3 本课程的特点	9
本章小结	10
习题	11
第2章 基础知识	12
2.1 选频网络	12
2.1.1 串联谐振回路	12
2.1.2 并联谐振回路	18
2.2 阻抗变换	26
2.2.1 串、并联阻抗的等效互换	26
2.2.2 抽头式阻抗变换	27
2.2.3 回路的插入损耗	31
2.3 选择性滤波器	32
2.3.1 LC集中选频滤波器	33
2.3.2 石英晶体滤波器	34
2.4 非线性电路分析基础	37
2.4.1 非线性元件的特性	38
2.4.2 非线性电路分析方法	42
2.5 模拟乘法器及其应用	47

2.6 变频器及其工作原理	53
2.6.1 晶体管混频器	55
2.6.2 二极管平衡混频器和环形混频器	60
2.6.3 差分对混频器和模拟乘法器混频器	67
2.6.4 混频器中的干扰	69
2.6.5 克服干扰的措施	75
本章小结	77
习题	79
第3章 高频小信号放大器	81
3.1 概述	81
3.2 晶体管高频小信号放大器等效电路与参数	84
3.2.1 y 参数等效电路	84
3.2.2 混合 π 参数等效电路	86
3.2.3 y 参数与混合 π 参数等效电路的转换	86
3.2.4 晶体管的高频参数	88
3.3 晶体管小信号放大器	89
3.3.1 单级单调谐回路放大器	89
3.3.2 多级单调谐回路放大器	96
本章小结	98
习题	99
第4章 高频功率放大器	102
4.1 概述	102
4.2 高频功率放大器的工作原理	104
4.2.1 工作原理及电压、电流波形	104
4.2.2 功率关系	106
4.3 高频功率放大器的近似折线分析法	108
4.3.1 晶体管特性曲线及其解析式	108
4.3.2 集电极余弦电流脉冲的分解	109
4.3.3 高频功率放大器的工作特性	112
4.3.4 高频功率放大器计算举例	117
4.4 高频功率放大器的电路组成	120
4.4.1 直流馈电线路	120

4.4.2 输入、输出间的耦合回路	122
4.5 高频功率放大器的实际电路	126
4.6 晶体管倍频器	127
本章小结	128
习题	129
第5章 正弦波振荡器	131
5.1 概述	131
5.2 LCR 回路中的瞬变现象	132
5.3 LC 振荡器的工作原理	135
5.3.1 LC 振荡器的工作条件	135
5.3.2 LC 三端式振荡器相位平衡条件	141
5.4 反馈型 LC 振荡器	142
5.4.1 互感耦合振荡器	142
5.4.2 电感反馈三端式振荡器	143
5.4.3 电容反馈三端式振荡器	144
5.4.4 两种改进型电容反馈振荡器	145
5.5 振荡器的频率稳定问题	147
5.6 石英晶体振荡器	149
5.7 压控振荡器	153
本章小结	155
习题	156
第6章 振幅调制与解调	159
6.1 概述	159
6.2 调幅波的基本性质	160
6.2.1 频谱及功率关系	163
6.2.2 单、双边带调幅	165
6.3 振幅调制的基本电路	168
6.3.1 低电平调幅电路	168
6.3.2 高电平调幅电路	178
6.4 检波原理及电路	179
6.4.1 包络检波	179
6.4.2 同步检波	184

本章小结	186
习题	187
第7章 角度调制与解调	189
7.1 概述	189
7.2 调角波的性质	191
7.2.1 瞬时频率和瞬时相位	191
7.2.2 调频波和调相波的数学表达式	191
7.2.3 调频波与调相波的频谱和带宽	195
7.3 调频的方法及电路	200
7.3.1 调频的方法和原理	201
7.3.2 直接调频	202
7.3.3 间接调频	209
7.4 调角信号的解调	214
7.4.1 鉴频方法和电路	214
7.4.2 相位鉴频	215
7.4.3 比例鉴频	218
本章小结	221
习题	222
第8章 反馈控制电路	225
8.1 概述	225
8.2 自动增益控制电路	225
8.3 自动频率控制电路	228
8.4 锁相环电路	231
8.4.1 性能分析及其数学模型	233
8.4.2 捕捉过程与跟踪过程	244
8.5 集成锁相环	251
8.6 锁相环电路的应用	254
本章小结	258
习题	258
参考文献	259

第1章 绪 论

本书主要讨论用于各种电子系统和电子设备中的高频电子线路。通信系统，特别是无线通信系统，已广泛应用于国民经济、国防建设和人们日常生活的各个领域。通信的目的与任务是传递消息。无线通信系统的一个重要特点是利用高频（无线电）信号来传递消息。

通信中传递消息的类型很多，传递消息的方法也很多。现代通信大多以电（或光）信号的形式出现，因此，通常称作电信号。传输电信号的媒质（或介质）可以有线的，也可以是无线的，而以无线的形式最能体现高频电路的应用。尽管各种无线通信系统在所传递消息的形式、工作方式以及设备组成等方面有很大差异，但设备中产生、接收和检测高频信号的基本电路都是相同的。本书将主要结合无线通信来讨论高频各单元电路的线路组成、工作原理和分析、设计、仿真方法。这不仅有利于明确学习基本电路的目的和加强对有关设备及系统的概念，而且对于其他通信系统也具有典型的意义。

1.1 无线通信系统概述

高频电路是通信系统，特别是无线通信系统的基础，是无线通信设备的重要组成部分。

1.1.1 无线通信系统的组成

麦克斯韦（Maxwel）在 1861 年从理论上预言了电磁波的存在，通过 1888 年赫兹（Hertz）的火花放电实验得以证明。从 1896 年马可尼（Marconi）的无线通信实验开始，出现了无线通信技术，并逐步涉及陆地、海洋、航空、航天等固定和移动无线通信领域。现在的无线通信技术已相当成熟，并还在继续发展。

无线通信的类型很多，可以根据传输方法、频率范围、用途等来分类。不同的无线通信系统，其设备组成和复杂度虽然有较大差异，但它们的基本组成不变。图 1.1 是模拟语音无线通信系统基本组成框图。

如图 1.1 所示，话筒和扬声器属于通信的终端设备，分别为信源和信宿。上、下两个音频放大器分别为放大话筒输出信号和推动扬声器工作而设置，是低频部件，本书不讨

论。发送端的音频放大器输出的信号控制高频载波振荡器的某个(些)参数,从而实现调制;下面的解调器是针对上面发射端的调制而进行的检波(调制的逆过程)。已调制信号的频率若不够高,可根据需要进行倍频或上混(变)频;若幅度不够,可根据需要进行若干级(通常有预放、激励和输出三级)放大,经天线辐射出去。接收机一般都采用超外差的形式,在通过高频选频放大(初步地选择放大并抑制其他无用信号)后进行下混(变)频,取出中频后再进行中频放大(主选择放大,具有较大的放大增益和较强的滤波能力)和其他处理,然后进行解调。超外差接收机的主要特点是:对接收信号的选择放大作用主要由频率固定的中频放大器来完成,当信号频率改变时,只要相应地改变本地振荡信号频率即可。图 1.1 中:虚线以上部分为发送设备(发信机),虚线以下部分为接收设备(收信机),天线及天线开关为收发共用设备;信道为自由空间。

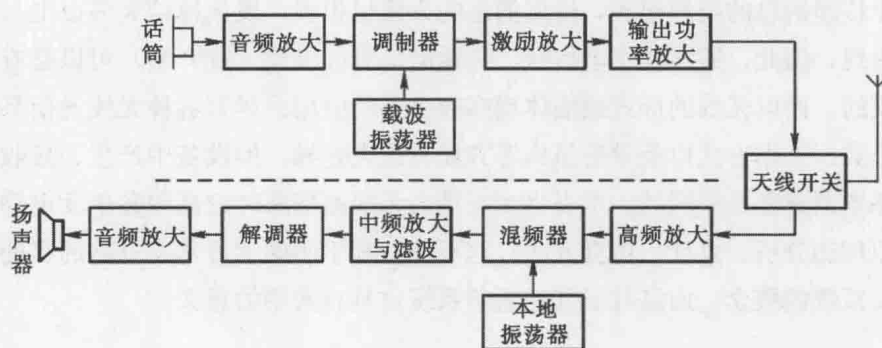


图 1.1 无线通信系统的基本组成框图

随着通信技术的发展,数字无线通信应用日益广泛。数字无线通信系统的组成与图 1.1 相似,只需将模拟通信终端换成数字通信终端,或者在模拟通信终端与调制解调器之间分别增加模/数转换器(ADC)和数/模转换器(DAC)即可。数字无线通信系统容易实现小型化,性能更加优越。在数字无线通信系统中,接收机的结构有多种类型,除传统的超外差结构外,还有数字中频结构、直接变换结构等。对于超外差结构,中频比信号载频低得多。因此,在中频上实现对有用信号的选择要比在载频上选择对滤波器 Q 值的要求低得多,容易实现稳定的高增益放大,同时也便于解调或 A/D 变换。超外差结构的最大缺点是组合干扰频率点多,特别是对于镜像频率干扰的抑制颇为麻烦,因此出现了多种镜频抑制接收方案。数字中频结构是将混频后的中频信号正交数字化,然后进行数字解调。数字中频接收的最大优点是可以共享 RF/IF 模块,由于解调和同步均采用数字化处理,灵活方便,也便于产品的集成和小型化。但在宽带通信中,需要选用高速的 ADC、宽带取样保持电路以及速度足够快的数字处理芯片。如图 1.2 所示,就是让本地振荡频率等于载频,使中频为零。因此也称为零中频结构,即不存在镜像频率,从而避免了镜频干扰的抑制问题。另外,直接变换结构中射频部分只有高放和混频器,增益低,易满足线性动态

范围的要求；由于下变频后为低频基带信号，只需用低通滤波器来选择信道即可，省去了价格昂贵的中频滤波器，也便于电路的集成。但是，直接变换结构也存在着本振泄漏、直流偏移、两支路平衡与匹配问题等缺点。随着 ADC 位置向天线端的前移，数字无线通信系统逐渐向软件无线电系统发展。

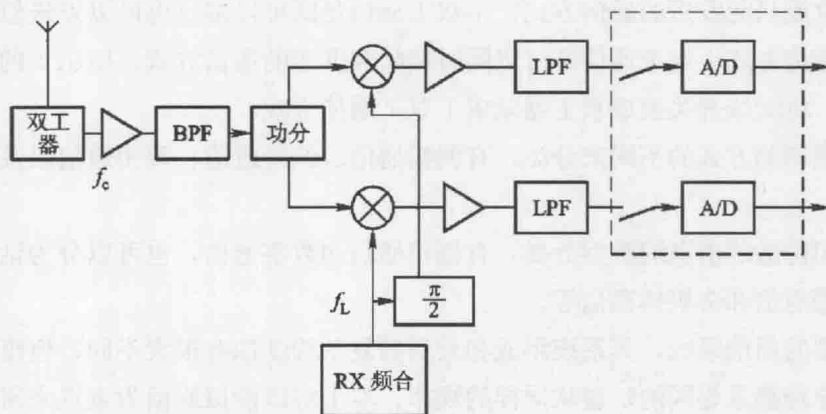


图 1.2 直接变换接收机结构

无论无线通信系统的组成结构如何变化，但其中必定包含高频电路，而且包含的高频电路的基本内容几乎不变。主要包括以下内容：

- (1) 高频振荡器（信号源、载波信号或本地振荡信号）；
- (2) 放大器（高频小信号放大器及高频功率放大器）；
- (3) 混频或变频（高频信号变换或处理）；
- (4) 调制与解调（高频信号变换或处理）。

在无线通信系统中通常需要某些反馈控制电路。这些反馈控制电路主要是自动增益控制（AGC）或自动电平控制（ALC）电路、自动频率控制（AFC）电路和自动相位控制（APC）电路（也称锁相环（PLL））。此外，还要考虑高频电路中所用的元器件和组件以及信道或接收机中的干扰与噪声问题。需要说明的是，虽然许多通信设备可以用集成电路（IC）来实现，但是上述的单元电路通常都是由有源的和无源的元器件构成的，既有线性电路也有非线性电路。这些基本单元电路的组成、原理及有关技术问题，就是本书的研究对象。应当指出，实际的通信设备比上面所举例子要复杂得多。比如，发射机的振荡器和接收机的本地振荡器就可以用更复杂的组件替换，它可以产生大量所需频率的信号。

1.1.2 无线通信系统的类型

无线通信系统的类型，可以根据不同的方法来划分。按照无线通信系统中关键部分的不同特性，有以下类型：

- (1) 按照工作频段或传输手段分类，有中波通信、短波通信、超短波通信、微波通信

和卫星通信等。工作频率主要指发射与接收的射频 (RF) 频率。射频实际上就是“高频”的广义语, 是指适合无线电发射和传播的频率。无线通信的一个发展方向是开辟更高的频段。

(2) 按照通信方式分类, 主要有单工通信、半双工通信和 (全) 双工通信。单工通信是指只能接收或只能发送的通信方式; 半双工通信是既可以接收也可以发送但不能同时接收和发送的通信方式; 双工通信是可以同时接收和发送的通信方式。图 1.1 的例子是半双工通信方式, 将天线开关换成双工器就成了双工通信方式。

(3) 按照调制方式的不同来分类, 有调幅通信、调频通信、调相通信以及混合调制通信等。

(4) 按照传送的消息的类型分类, 有模拟通信和数字通信, 也可以分为话音通信、图像通信、数据通信和多媒体通信等。

不同类型的通信系统, 其系统组成和设备的复杂程度都有很大不同, 但组成设备的基本电路及其原理都是相同的, 遵从同样的规律。本书将以模拟通信为重点来研究这些基本电路, 认识其规律。这些电路和规律完全可以推广应用到其他类型的通信系统。

1.2 无线电信号与调制

自然界中存在的电磁波波谱很宽, 如图 1.3 所示, 无线通信中所用的无线电波是一种波长比较长的电磁波, 占据的频率范围很广。在自由空间中, 波长与频率存在关系:

$$c = f\lambda$$

式中: c 为光速; f 、 λ 分别为无线电波的频率和波长。

因此, 无线电波也可以认为是一种频率相对较低的电磁波。无线电波的频率是一种不可再生的重要资源。

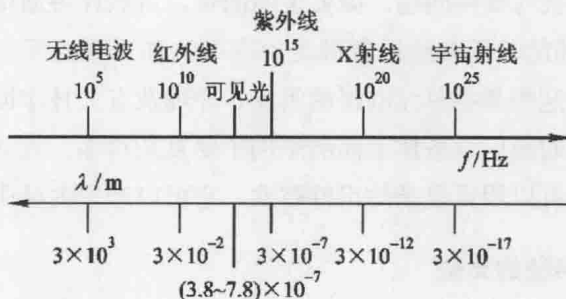


图 1.3 电磁波波谱

对频率或波长进行分段, 分别称为频段或波段。不同频段信号的产生、放大和接收的

方法不同,传播的能力和方式也不同,因而它们的分析方法和应用范围也不同。表1.1列出了无线电波的频(波)段划分、主要传播方式和用途。表中关于频段、传播方式和用途的划分是相对而言的,相邻频段间无绝对的分界线。

表1.1 无线电波的频(波)段划分、主要传播方式和用途

波段名称		波长范围	频率范围	频段名称	主要传播方式和用途
长波 (LW)		$10^3 \sim 10^4 \text{ m}$	$30 \sim 300 \text{ kHz}$	低频 (LF)	地波: 远距离通信
中波 (MW)		$10^2 \sim 10^3 \text{ m}$	$300 \text{ kHz} \sim 3 \text{ MHz}$	中频 (MF)	地波、天波; 广播、通信、导航
短波 (SW)		$10 \sim 100 \text{ m}$	$3 \sim 30 \text{ MHz}$	高频 (HF)	天波、地波; 广播、通信
超短波 (VSW)		$1 \sim 10 \text{ m}$	$30 \sim 300 \text{ MHz}$	甚高频 (VHF)	直线传播、对流层散射; 通信、电视广播、调频广播、雷达
微波	分米波 (USW)	$10 \sim 100 \text{ cm}$	$300 \text{ MHz} \sim 3 \text{ GHz}$	特高频 (UHF)	直线传播、散射传播; 通信、中继与卫星通信、雷达、电视广播
	厘米波 (SSW)	$1 \sim 10 \text{ cm}$	$3 \sim 30 \text{ GHz}$	超高频 (SHF)	直线传播: 中继和卫星通信、雷达
	毫米波 (ESW)	$1 \sim 10 \text{ mm}$	$30 \sim 300 \text{ GHz}$	极高频 (EHF)	直线传播: 微波通信、雷达

“高频”也是一个相对的概念,表中的“高频”指的是短波频段,其频率范围为 $3 \sim 30 \text{ MHz}$,这只是“高频”的狭义解释。而广义的“高频”指的是射频,其频率范围非常宽。只要电路尺寸比工作波长小得多,仍可用集中参数来分析实现,都可认为属于“高频”范围。就目前的技术水平来讲,“高频”的上限频率可达微波频段(如 3 GHz)。

需要强调指出,不同频段的信号具有不同的分析与实现方法。对于米波以上(含米波, $\lambda \geq 1 \text{ m}$)的信号通常用集总参数的方法和“路”的概念来分析实现,而对于米波以下($\lambda < 1 \text{ m}$)的信号一般应用分布参数的方法和“场”的概念来分析实现。对应地,上述“高频”信号可用电路来实现,称为“高频电路”,频率很高的微波信号要用“场”来研究与实现。

在高频电路中,要处理的无线电信号主要有消息(基带)信号、高频载波信号和已调信号三种。基带信号指没有进行调制之前的原始信号,也称调制信号。高频载波信号指用于调制的高频振荡(载波)信号和用于解调的本地振荡信号(或称恢复载波),一般为单一频率的正弦(或余弦)信号或脉冲信号。已调信号指调制信号对载波信号进行调制以后的信号。前者通常为低频信号,后两者通常属于高频的范畴。

无线电信号有多方面的特性,主要有时间(域)特性、频谱特性、调制特性、传播特性等。

1.2.1 时间特性

一个无线电信号，可以将它表示为电压或电流的时间函数，通常用时域波形或数学表达式来描述。对于较简单的信号（如正弦波、周期性方波等），用这种方法表示很方便。无线电信号的时间特性是信号随时间变化快慢的特性。信号的时间特性要求传输该信号电路的时间特性（如时间常数）与之相适应。

1.2.2 频谱特性

对于较复杂的信号（如话音信号、图像信号等），用频谱分析法表示较为方便。这是因为任何形式的信号都可以分解为许多不同频率、不同幅度的正弦信号之和，如图 1.4 所示。图中实线为一重复频率为 F 的方波脉冲信号，长虚线为该脉冲信号的直流分量，点画线为基波分量，短虚线为其直流分量、基波分量和三次谐波分量之和。谐波次数越高，幅度越小，影响就越小。

对于周期性信号，可以表示成许多离散的频率分量（各分量间成谐波关系）各频率分量可以是正弦或余弦函数，如图 1.4 所示。在实际工作中，为了表征不同信号的谐波组成或情况，经常画出周期信号各次谐波的分布图形。这种图形称为信号的频谱图。图 1.5 为图 1.4 的频谱图。对于非周期性信号，可以用傅里叶变换的方法分解为连续谱，信号为连续谱的积分。

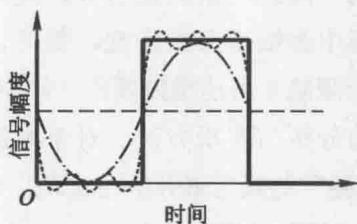


图 1.4 周期信号分解



图 1.5 频谱图

频谱特性包含幅频特性和相频特性两部分，它们分别反映信号中各个频率分量的振幅和相位的分布情况。任何信号都会占据一定的带宽。从频谱特性上看，带宽是信号能量主要部分（一般为 90% 以上）所占据的频率范围或频带宽度。不同的信号，其带宽不同。比如，话音的频率范围为 $100\text{Hz} \sim 6\text{kHz}$ ，其主要能量集中在 $300\text{Hz} \sim 3.4\text{kHz}$ 。射频频率越高，可利用的频带宽度就越宽。不仅可以容纳许多互不干扰的信道，实现频分复用或频分多址，而且也可以传播某些宽频带的消息信号（如图像信号），这是无线通信采用高频的原因之一。

1.2.3 传播特性

无线通信的传输媒质（或传输信道）主要是自由空间。由于地球表面及空间层的环境条件不同，因此发射的无线电波因其频率或波长不同，传播特性也不同。传播特性指的是无线电信号的传播方式、传播距离、传播特点等。无线电信号的传播特性主要根据其所处的频段或波段来区分。电磁波从发射天线辐射出去后，不仅电波的能量会扩散衰减，接收机只能接收到其中极小的一部分，而且在传播过程中，电波的能量会被地面、建筑物或高空的电离层吸收或反射，或者在大气层中产生折射或散射等现象，造成到达接收机时的强度大大衰减。在移动无线环境中，还会由多径的原因而产生快衰落。根据无线电波在传播过程所发生的现象，电波的传播方式主要有直射（视距）传播、绕射（地波）传播、折射和反射（天波）传播及散射传播等，如图 1.6 所示。决定传播方式和传播特点的关键因素是无线电信号的频率。

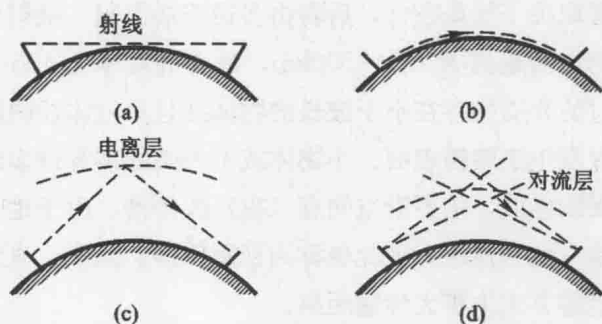


图 1.6 无线电波的主要传播方式

(a) 直射（视距）传播；(b) 绕射（地波）传播；(c) 折射和反射（天波）传播；(d) 散射传播。

一般来讲，无线电信号的辐射是多方向的。由于地球是一个巨大的导体，电波沿地面传播（绕射）时能量会被吸收（趋肤效应引起），通常是波长越长（或频率越低），被吸收的能量越少，损耗就越小，因此，中、低频（或中、长波）信号可以以地波的方式绕射传播很远，并且比较稳定，多用做远距离通信与导航。实际上，绕射依赖于电波的波长、物体的体积与形状、绕射点入射波的振幅、相位和极化情况等，当电波的波长大于物体的体积时容易发生绕射。

短波波段的无线电波沿地面传播的距离很近，远距离传播主要靠电离层。地球外部包裹着厚厚的大气层，在大气层中离地面 60~600km 的区域称为电离层。它是由于太阳和星际空间的辐射引起大气电离而产生的。电离层从里往外可以分为 D、E、F₁、F₂ 四层，D 层和 F₁ 层在夜晚几乎完全消失，因此经常存在的是 E 层和 F₂ 层。电离层对通过的电波也有吸收作用，频率越高的信号，电离层吸收能力越弱，或者说电波的穿透能力越强。因此，频率太高的信号会穿过电离层而达到外层空间。另外，电离层也是一层介质，对射向

它的无线电波会产生反射与折射作用。入射角越大,越易反射;入射角太小,容易折射。在通常情况下,对于短波信号, F_2 层是反射层,D、E层是吸收层(因为它们的电子密度小,不满足反射条件)。 F_2 层的高度为250~300km,所以,一次反射的最大跳距约为4000km。应当指出,由于电离层的状态随着时间(年、季、月、天、小时甚至更小单位)而变化,因此,利用电离层进行的短波通信并不稳定。但由于电离层离地面较高,因此,短波通信是一种价格低廉的远距离通信方式。需要指出,电波的反射传播不只是存在于电离层中。当电波遇到比波长大得多的物体时将产生反射,也就是说,反射也发生于地球表面、建筑物表面等许多地方。

在离地面10~12km范围内的大气层称为对流层。该层的空气密度较高,所有的大气现象(如风、雨、雷、电等)都发生在这一层。散射现象也主要发生在对流层。在这个层中,由于大气湍流运动等原因形成的不均匀性就是电波的散射源。散射具有很强的方向性和随机性。接收到的能量与入射线和散射线的夹角有关。散射信号随时间的变化分为慢衰落和快衰落两种,前者取决于气象条件,后者由多径传播引起。散射传播还有一定的散射损耗。散射传播一跳的传播距离为100~500km,适合的频率为400~6000MHz。需要指出,散射是在电波通过的介质中存在小于波长的物体并且单位体积内阻挡体的个数非常大时产生的,因此,散射发生于粗糙表面、小物体或不规则物体等许多地方。频率较高的超短波及其更高频率的无线电波,主要沿空间直(视)线传播。由于地球曲率的原因,直射传播的距离有限,通常只能为视距,因此也称为视距传播。当然,直线传播方式可以通过架高天线、中继或卫星等方式来扩大传输距离。

总之,长波信号以地波绕射为主;中波和短波信号可以以地波和天波两种方式传播,不过,前者以地波传播为主,后者以天波(反射与折射)为主;超短波以上频段的信号大多以直射方式传播,也可以采用对流层散射的方式传播。

1.2.4 调制特性

调制在无线通信中的作用至关重要。无线电传播一般采用高频(射频)的另一个原因是高频适于天线辐射和无线传播。只有当天线的尺寸大到可以与信号波长相比拟时,天线的辐射效率才会较高,从而以较小的信号功率传播较远的距离,接收天线也才能有效地接收信号。若把低频的调制信号直接馈送至天线上,要想将它有效地变换成电磁波辐射,则所需天线的长度几乎无法实现。如果通过调制,把调制信号的频谱搬至高频载波频率,则收发天线的尺寸就可大为缩小。此外,调制还有一个重要作用是可以实现信道的复用,提高信道利用率。

调制是把信号变换成适合于在信道(传输链路)中进行传输的形式的一种过程。在无线通信中,基本的调制方法是使高频载波信号的一个或几个参数(振幅、频率或相位)按照基带调制信号的规律而变化。根据载波受调参数的不同,调制分为振幅调制(AM,简