

## 内 容 提 要

本书讨论无线电高频(射频、中频)电路的基本工作原理、分析方法和测试方法。联系实际选取通信、电视、雷达设备中的一些典型电路作为分析对象,并给出计算实例。

本书上册讨论谐振回路、调谐放大与宽带中放、非线性与参变电路分析、高频功率放大与倍频、自激振荡,下册讨论调幅检波、调频鉴频、数字信号的调制与解调、混频、噪声、场效应管高频电路以及自动增益控制、自动频率调节、电调谐与锁相环路等。

本书可作为高等院校无线电技术类专业高频电路课程的教材或参考书,也可供本专业设计和技术人员参考。

## 高 频 电 路

### 上 册

清华大学通信教研组

•

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

•

开本: 850×1168 1/32 1979年2月第 一 版  
印张: 19 8/32 页数: 308 1979年2月河北第一次印刷  
字数: 510 千字 印数: 1—36,000 册

统一书号: 15045·总2268—无659

定价: 2.00 元

# 目 录

## 第一章 绪论

1.1 无线电发送设备的工作过程和基本原理 .....	2
1.2 无线电接收设备的工作过程和基本原理 .....	5
1.3 信号及其频谱 .....	8
1.4 调幅信号的频谱 .....	14
1.5 无线电波段的划分 .....	17
1.6 无线电波的传播 .....	19
1.7 干扰与噪声 .....	24
1.8 本书的研究对象和内容 .....	26
习题 .....	28

## 第二章 单谐振回路 .....

2.1 引言 .....	31
2.2 谐振回路元件 .....	33
2.3 串联谐振回路 .....	39
2.4 并联谐振回路 .....	46
2.5 谐振回路的幅频特性分析—通频带与选择性 .....	53
2.6 谐振回路的相频特性分析—群时延特性 .....	60
2.7 信号源内阻及负载对谐振回路的影响 .....	64
2.8 并联谐振回路的耦合联接、接入系数 .....	69
2.9 并联谐振回路的典型计算 .....	81
2.10 谐振回路中的能量关系 ( $Q$ 值的物理意义) .....	88
2.11 回路元件参数的测量— $Q$ 表 .....	92
2.12 谐振回路的自由振荡现象 .....	96

习题	102
<b>第三章 耦合回路</b>	107
3.1 引言	107
3.2 矩形系数	109
3.3 电容耦合双回路的谐振曲线	112
3.4 互感耦合双回路	120
3.5 耦合回路的反映阻抗	124
3.6 双谐振回路的典型计算	131
3.7 谐振曲线的测试、扫频仪	137
习题	140
<b>第四章 小信号调谐放大器</b>	143
4.1 引言	143
4.2 晶体管的物理参量和高频等效电路	145
4.3 晶体管的几个频率参数	152
4.4 晶体管的 $y$ 参量等效电路	157
4.5 调谐放大器的最大功率放大倍数和晶体管的最高振荡频率	164
4.6 单调谐放大器	170
4.7 多级单调谐放大器的级联	176
4.8 双调谐放大器	179
4.9 参差调谐放大器	186
4.10 放大器的输入导纳和输出导纳	192
4.11 晶体管内部反馈的有害影响及解决办法	195
4.12 放大器的最大稳定增益	200
4.13 调谐放大器的计算举例	204
习题	208
<b>第五章 宽频带中频放大器</b>	212
5.1 引言	212
5.2 共基极宽频带放大器	213

5.3	负反馈对管宽带放大器 .....	223
5.4	负反馈对管放大器的计算 .....	234
5.5	集成化放大器 .....	238
5.6	LC带通滤波器 .....	243
5.7	声表面波滤波器 .....	257
5.8	中频放大器的结构 .....	269
5.9	中放阻抗的测量和调整 .....	274
	习题 .....	279
<b>第六章</b>	<b>非线性电路与参变电路分析引论</b> .....	<b>281</b>
6.1	引言 .....	281
6.2	线性元件与非线性元件 .....	282
6.3	非线性特性的幂级数表示法 .....	285
6.4	非线性特性的幂级数分析法 .....	288
6.5	两个正弦信号作用在非线形电路 .....	292
6.6	非线性特性的折线表示法和非线性电路的折线分析 法 .....	295
6.7	变容二极管的基本特性 .....	299
6.8	变容二极管电路的分析方法 .....	303
6.9	参变电路的初步概念、门雷——罗威关系式 .....	312
6.10	小结 .....	321
	习题 .....	323
<b>第七章</b>	<b>高频功率放大与倍频</b> .....	<b>326</b>
7.1	引言 .....	326
7.2	功率谐振放大器的工作原理与能量关系 .....	330
7.3	功率晶体管的高频效应与安全工作区 .....	350
7.4	功率谐振放大器工作状态的计算与调整 .....	364
7.5	高频功率放大器电路参数计算 .....	378
7.6	宽频带高频功率放大器 .....	403
7.7	功率的合成与分配 .....	428

7.8	倍频器 .....	442
7.9	高频功率的测量 .....	456
	习题 .....	459
<b>第八章</b>	<b>正弦波自激振荡 .....</b>	<b>461</b>
8.1	引言 .....	461
8.2	反馈型正弦波自激振荡器基本原理 .....	462
8.3	自激振荡的平衡条件、起振条件和稳定条件 .....	469
8.4	三点式LC振荡器——三点线路 .....	476
8.5	改进型电容反馈三点线路 .....	488
8.6	振荡器的频率稳定 .....	498
8.7	石英(晶体)谐振器 .....	504
8.8	石英晶体振荡器电路 .....	513
8.9	振荡器的幅度稳定 .....	524
8.10	振荡器电路和参数的选择 .....	527
8.11	振荡器的调整与测量 .....	530
8.12	间歇振荡与频率牵引 .....	540
8.13	RC振荡器 .....	548
8.14	负阻振荡器 .....	558
	习题 .....	568
<b>附录一</b>	<b>部分习题答案 .....</b>	<b>575</b>
<b>附录二</b>	<b>部分计算问题的计算机程序与数值结果(用“130”机 “BASIC”语言) .....</b>	<b>583</b>
<b>附录三</b>	<b>最大平坦型和等波纹型低通原型滤波器的归一化衰减 特性 .....</b>	<b>597</b>
<b>附录四</b>	<b>最大平坦型和等波纹型滤波器的归一化元件表 .....</b>	<b>600</b>

# 第一章 绪 论

近百年来，在自然科学方面有很多重大的发现和发明，无线电是这些发明中极其重要的一种。它从诞生到现在的八十多年中，对人类的生活和生产活动起着非常深刻的作用和影响。

无线电技术最早应用在通信方面。随着科学技术的不断发展，它的应用范围迅速扩大。现在所说的无线电通信，已远远超出一般通信的领域，而扩展为各种性质的消息的传递，并成为各种科学技术以及工农业生产的重要工具。

传输信息的系统，统称为通信系统。在无线电电子学这门学科中，通信系统是其中的一个重要的分支，它的工作原理和工作过程也具有普遍的、典型的意义。因此，在这本书中，我们将以通信系统为主要对象，阐述无线电技术的一些问题。

一个完整的通信系统应包括信号源、发送设备、传输信道、接收设备和受信装置五部分，如方框图1—1所示。传输信道的种类视具体情况而定，它可以是平行线（如架空明线等）、电缆、或光缆，也可以是传输无线电波的自由空间。

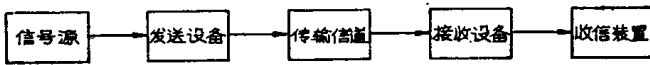


图 1—1 通信系统方框图

本书介绍无线电发送设备和接收设备的工作原理和组成，着重讨论构成发送、接收设备的各种单元电路的工作原理、典型线路和分析方法。在具体介绍这些单元电路之前，先扼要介绍无线电广播的原理，说明无线电信号的发送和接收过程，以及收、发设备的组成，使读者对无线电通信系统有一全面的认识，对各组成部分之间的有机联系有所了解。

## 1.1 无线电发送设备的工作过程和基本原理

所谓无线电广播是指把声音或图象，以“无线电”为手段传送给远方的听众（或观众）的意思。

现在的问题是，无线电是怎样把声音或图象信号传送出去呢？

我们知道：人耳能听到的声音的频率约在20赫到20千赫的范围内，通常把这一频率范围叫做音频。声波在空气中传播的速度很慢，约340米/秒，而且衰减很快。一个人无论怎样尽力高喊，他的声音也不会传得很远。为了把声音传送到远方，常用的方法是将它变成电信号，再设法把信号播送出去。将声音变为电信号的任务一般由话筒（也叫麦克风）来承担。当播音员对着话筒说话时，话筒就输出相应的电压，这个电压的变化规律与声音的变化规律相同，如图1—2所示。

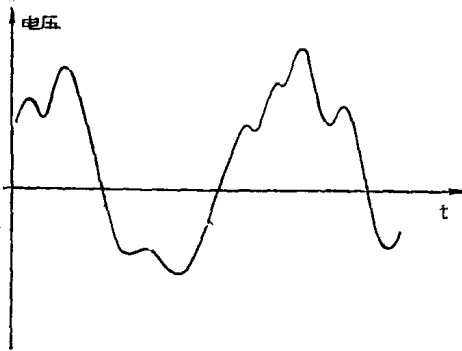


图 1—2 声音信号的波形

慢，约340米/秒，而且衰减很快。一个人无论怎样尽力高喊，他的声音也不会传得很远。为了把声音传送到远方，常用的方法是将它变成电信号，再设法把信号播送出去。将声音变为电信号的任务一般由话筒（也叫麦克风）来承担。当播音员对着话筒

说话时，话筒就输出相应的电压，这个电压的变化规律与声音的变化规律相同，如图1—2所示。

从话筒得到的电信号的强度一般都很小，通常只有几毫伏至零点几伏，需要用音频放大器加以放大。经过放大后的音频信号可以利用导线传送出去，再经喇叭恢复为原来的声音。这就是通常的有线广播。

怎样才能不用导线，将声音的信号由天空传播出去呢？

我们知道，交变的电振荡可以利用天线向空中辐射出去。但是天线的尺寸必须足够长，这种无线电辐射才有效。具体地说，天线长度必须和电振荡的波长可以比拟，才能有效地把电振荡辐射出去。前面讲过，声音信号的频率约为20至20000赫，即其波长范围

是 $15 \times 10^3$ 至 $15 \times 10^6$ 米，要制造出与此尺寸相当的天线显然是很困难的。因此直接将音频信号辐射到空中去很不容易，而且即使辐射出去，各个电台所发出的信号频率都相同，它们在空中混在一起，收听者也无法选择所要接收的信号。因此要想不用导线传播声音信号，就必须利用频率更高（即波长较短）的电振荡，并设法把音频信号“装载”在这种高频振荡之中，然后由天线辐射出去。这样，天线尺寸可以比较小，不同的广播电台也可以采用不同的高频振荡频率，使彼此互不干扰。

无线电广播台中产生高频电振荡的部件叫“高频振荡器”，把音频信号“装到”（控制）高频振荡的过程叫做调制，经过调制以后的高频振荡叫做“已调信号”。利用传输线把已调信号送到天线，就可以把它辐射出去，传送到远方。

综合上面的分析，归纳起来，一个广播发射机应包括四个组成部分：

一是声音的变换与放大，这一部分的频率较低，叫做“低频部分”；二是高频振荡的产生、放大与调制，统称“高频部分”；三是天线与传输线；四是直流电源

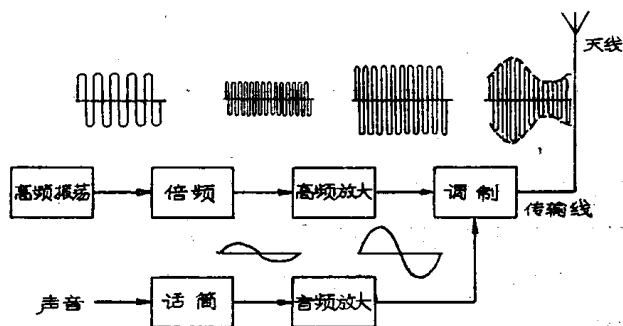


图 1—3 广播发射机的方框图

部分。图1—3画出发射机的方框图，直流电源部分在图中没有画出。

下面介绍发射机高频部分的工作原理，着重说明调制的作用和方法。

图1—3中，高频振荡器的作用是产生高频振荡。目前广播用的高频振荡都是正弦波。这种高频电波是用来运载声音信号的，我们就把它叫做载波。它的频率叫做载频。例如中央人民广播电台的一



个频率是640千赫，波长约469米。在广播发射机中，高频振荡器所产生的电振荡的频率不一定恰好等于所需要的载波频率，可能是后者的若干分之一；它的电压一般也比较小。需要用倍频器把频率提高到所需要的数值，再用高频放大器放大到一定的强度。图1—3中的波形图清楚地表明了这种倍频和放大的作用。

现在来讲讲调制的作用。

我们知道，一个高频正弦振荡可以表示为：

$$u_c(t) = U_c \cos(\omega_c t + \varphi_c) \quad (1-1)$$

其波形画在图1—4(a)。  $u_c$  是高频正弦振荡的瞬时值，  $U_c$  是它的振幅，  $\omega_c$  是角频率，  $\varphi_c$  是初始相角。

为了说明问题方便起见，先假定音频信号也是一个正弦波，它的表示式是（图1—4b）：

$$u_\Omega(t) = U_\Omega \cos \Omega t \quad (1-2)$$

这里  $U_\Omega$  是正弦音频信号的振幅，  $\Omega$  是音频角频率。照理，它也应有一个初始相角  $\varphi_\Omega$ ，这里暂时假设  $\varphi_\Omega = 0$ 。

将音频信号“装载”到高频振荡中去的方法有好几种。广播台中常用的方法是所谓调幅。这种方法是：令高频振荡的振幅随音频信号而变化。说详细一点，当音频信号的瞬时值  $u_\Omega = 0$  时，高频振荡的振幅保持为原来的数值  $U_c$ ；当  $u_\Omega$  增大时，高频振幅也增大；而当  $u_\Omega$  减小时，高频振幅也减小。这样，高频振荡的振幅可以写成

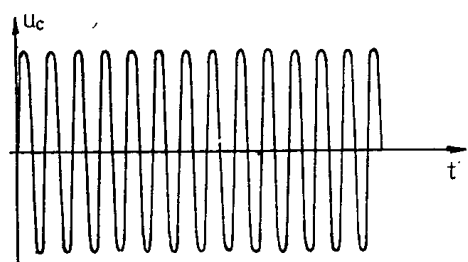
$$U_c(1 + m \cos \Omega t)$$

相应的高频电振荡叫做“调幅波”，其波形如图1—4(c)所示。它的表示式是：

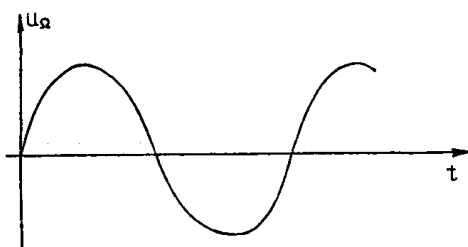
$$u(t) = U_c(1 + m \cos \Omega t) \cdot \cos(\omega_c t + \varphi_c) \quad (1-3)$$

$m$  是一小于1的常数，叫做“调幅系数”。它应该和音频信号的  $U_\Omega$  成正比，调幅信号才没有失真。

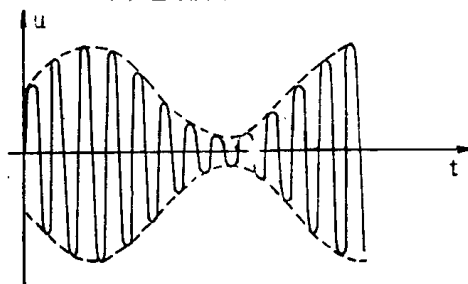
以后我们可以看到，调幅后的信号，已经不是原来的音频信号，也不是单纯的载频振荡，而是包含若干个频率分量的高频电振



(a) 载波信号



(b) 音频信号



(c) 调幅信号

图 1—4 调幅波形图

荡。因此，把声音信号对高频载波进行调幅以后，利用实际上可以做得到的、尺寸较小的天线，就可以把它从空中辐射出去，传送给远方的听众。这就是无线电广播发射信号的基本过程。

顺便说一下，把音频信号“装载”到高频振荡中去的方法还可以用调频和调相。所谓调频是指高频振荡的角频率 $\omega_c$ 随音频信号瞬时值 $u_a$ 的变化而变化；所谓调相则是指初始相角 $\varphi_c$ 随 $u_a$ 的变化而变化。这些方法在无线电技术中也广泛应用，以后还要详细讨论。

我国目前中短波段语音广播大都采用调幅制；电视广播中图象部分采用调幅制，伴音部分则采用调频制；大多数雷达信号是调幅信号；通信系统

大都采用调幅和调频，但是在数字通信中，调相制具有一些优点，是近年来迅速发展的一种调制方式。

## 1.2 无线电接收设备的工作过程和基本原理

现在来讨论无线电接收机的工作原理。最简单的接收机的构造可以用图1—5的方框图来表示。

接收机的工作过程恰好和发射机相反，它的基本任务是将天空

中传来的电磁波接收下来，并把它复原成为原来的信号。

接收从空中传来的电磁波的任务是由接收天线来完成的。这里

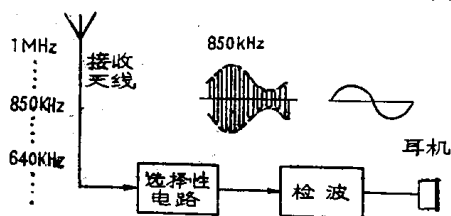


图 1—5 简单接收机的方框图

必须注意的是：由于广播电台很多，在同一时间内，接收天线所收到的将不仅是我们希望收听的电台的信号，而是包含若干个来自不同电台的、具有不同载频的无线电信号。这些广播电台之所以

采用各种不同的载频，其目的就是让听众按照电台频率的不同，设法选择出所需要的节目。因此在接收天线之后，应该有一个选择性电路。它的作用就是把所要接收的无线电信号挑选出来，并把不要的信号滤掉，以免产生干扰。选择性电路是由振荡线圈  $L$  和电容器  $C$  组成的。这种  $LC$  电路通常叫做振荡回路，也叫谐振回路。收听广播时，我们总是要调节接收机里的可变电容器，其作用就是使振荡回路调谐到我们要收听的电台的频率，例如图1—5中，设被收听的电台频率是 850 千赫，选择电路的谐振频率就必须和它对准。 $LC$  谐振回路的问题将在第二章和第三章中详细介绍。

选择性电路的输出就是某个电台的高频调幅波。利用它直接去推动耳机（收信装置）是不成的，还必须先把它恢复成原来的音频信号。这种从高频调幅波中检取出音频信号的过程叫做检波（也叫做解调），相应的部件叫做检波器或解调器。把检波器获得的音频信号送到耳机，就可以收听到所需要的广播节目。

上面所讲的只是接收机的最基本的工作过程。这种最简单的接收机叫做直接检波式接收机。实际上的接收机比较复杂。这是因为：第一、从接收天线得到的高频无线电信号通常非常微弱，一般只有几十微伏至几毫伏，直接把它送到检波器进行检波不太合适，最好在选择性电路和检波器之间插入一个高频放大器，把高频调幅信号加以放大。通常，送到检波器的高频调幅信号的电压约需几百毫伏，因此高频放大器的电压放大倍数大约需要几百倍至几万

倍。第二、即使接收机已经增加了高频放大器，检波器输出的音频信号通常也只有几百毫伏，用耳机收听是足够了，推动功率大一点的扬声器就嫌太小。因此接收机大都需要有音频放大器，把检波器的输出信号加以放大，再推动扬声器。这种带有高频放大器的接收机叫做高放式接收机，它的灵敏度较高，输出功率也较大。但也有不少缺点，主要是选择性还不好、调谐也比较复杂。这是因为，要把天线来的高频信号放大到几百毫伏，一般需要用几级高频放大器，而每一级高频放大器大都需要有一个由  $LC$  组成的谐振回路。当被接收信号的频率改变时，整个接收机的所有  $LC$  谐振回路都需要重新调谐，很不方便。为了克服这种缺点，现在的接收机几乎都采用超外差式的线路。图1—6画出了典型的超外差接收机的方框图。

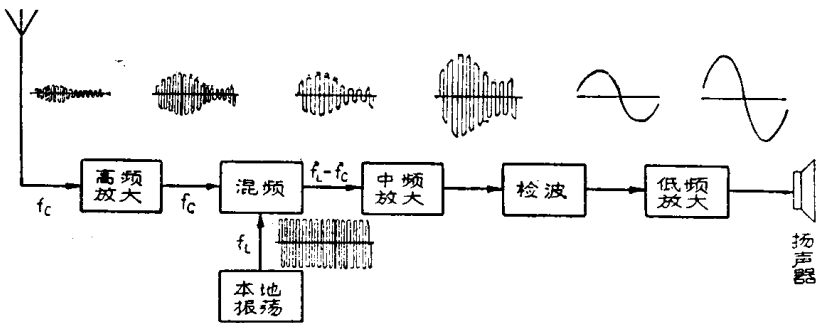


图 1—6 超外差收音机方框图

超外差接收机的主要特点是：把被接收的高频调幅信号的载波频率  $f_c$  先变为频率较低的而且是固定不变的中间频率  $f_i$ （叫做中频），再利用中频放大器加以放大，然后进行检波。

把高频信号的载波降低为中频的任务是由混频器来完成的。在第十章介绍混频器时，我们将证明：把一个载频  $f_c$  的调幅波和一个频率为  $f_L$  的正弦波同时加到混频器上，经过变频以后所得到的仍是一个调幅波，不过它的“载波”频率已经不是原来的载频  $f_c$ ，而是这两个频率之差，即等于  $(f_L - f_c)$ 。通常这个新的“载波”频率比原来的载频低，但比音频信号的频率高，习惯上就把它叫做中

频，变频后产生的新的调幅信号叫做中频信号，广播收音机的中频大都是465千赫，电视广播接收机图象部分的中频是37兆赫，雷达和微波通信机的中频比较高，大致是十几兆赫至几十兆赫。

从上面的讨论可以看出：在超外差接收机中为了产生变频作用，还需要有一个外加的正弦信号。这个信号通常叫做外差信号，产生外差信号的部件叫做外差振荡器，有时也叫本地振荡器。在广播接收机中，外差信号的频率应该随时和被接收信号频率相差465千赫，因此接收机混频器之前的选择性电路和外差振荡器最好采用统一调谐的机构，使两者的频率之差经常保持为固定的数值。经变频后得到的中频信号用中频放大器来放大。由于变频后的“载波”频率是固定的，所以中频放大器的谐振回路不需要随时调整，选择性也容易做好。这是超外差接收机的优点。

前面我们扼要地介绍了无线电广播电台发送信号和接收信号的基本原理。虽然讲的只是关于语音广播的特殊情况，但它是有典型意义的。根据这种原理也可以传送任何其它的信号，例如雷达信号、电报报文、电视图象和测量数据等等。关键是必须把被传送的对象先变换成电信号（例如电视广播用摄像管把活动图象变成电信号等等），然后根据上面所讲的原理，做成相应的发射机和接收机，就可以把各式各样信号传播出去。因此，这两节所介绍的收、发信机的基本原理和方框图，对于其他的通信系统来说，基本上也是适用的。

### 1.3 信号及其频谱

从上面的介绍看出：消息或信号是通信系统的工作对象，消息或信号的传递是通信系统的基本任务，完成这个任务的主要手段则是电子电路。因此，对于信号和电路，都应该有较深入的了解，才能更好掌握通信系统的原理，设计出所需的技术装备。

在实际应用中，我们所遇到的信号千变万化，多种多样，如话

音、电视、雷达和数据信号等等。图1—7画出两种最简单、但具有典型意义的信号。其中 (a) 是正弦信号, (b) 是矩形脉冲信号。

正弦信号是我们熟知的一种基本信号。电工课中所讲的正弦波就是这种信号, 上面所讲的高频载波 (参看图1—4 a 和式1—1) 也是正弦信号。这种信号的特点是: 信号电压瞬时值  $u$  随时间而连续不断地变化。通常把它叫做连续信号。

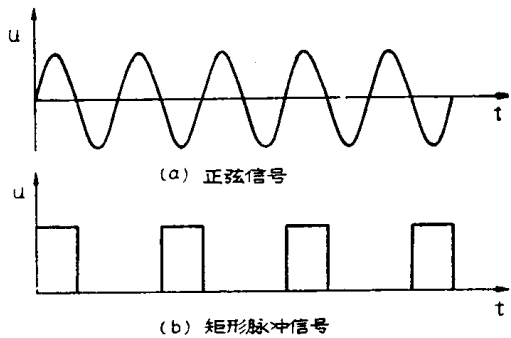


图 1—7 正弦信号和脉冲信号

矩形脉冲信号也是一种基本信号。电视、雷达和数字电路中经常用到这种信号。它的特点是: 信号电压, 时有时无, 和脉搏的跳动相似, 有跳有停, 因而我们把它叫做脉冲信号。

实际上的信号比上述两种信号要复杂得多。例如前面讲过的从话筒输出的声音信号 (图1—2) 就比较复杂。它也是连续信号, 但比正弦信号要复杂一些。用它对高频载波进行调制以后, 其波形就更为复杂 (参看图1—4 c)。因此, 在研究各种信号的产生、变换和传递时, 首先要解决的问题是: 如何确切而方便地把信号表示出来?

表示信号的方法大致上有三种: 一是写出它的数学表示式 (如式1—1和式1—3等), 另一种方法是画出它的波形图 (可以用示波器看到), 还有一种方法就是所谓频谱表示法。

前两种方法, 我们已有初步的了解, 对于较简单的信号, 用这些方法是较方便的。但是对于无线电系统中大量的实际问题, 仅用这两种方法是很不够的。这是因为规律复杂的信号或者无规律的随机信号, 写表示式和画波形都很麻烦, 也不易表达清楚。在表示信号变换的过程中不能突出主要矛盾, 对于相应的电路设计也不便于提出明确、直观的要求。信号频谱表示法是解决这个问题的较好的方

法。下面扼要介绍这种方法。

一切客观事物本来是互相联系的和具有内部规律的。正弦信号与各种复杂信号之间的内在联系就表现在任何形式的信号，都可分解为许多不同频率的正弦信号之和。所谓“频谱”就是指组成信号的各正弦信号按频率分布的情况。

日常生活中最常遇见的是声音信号。我们就从声音信号说起。

声音信号就是由各种频率的正弦波组合而成的。音乐上的各种“调”实质上是指具有不同频率的正弦信号。例如A调“1”的频率是440赫，C调是523.25赫。十二个调子对应十二个标准频率。我国早在两千多年前就用一定长度的竹管作成这十二个元音的标准信号发生器。在现代电子技术中，用振荡电路产生所需频率的正弦波，也可给出各种标准音调。

庄严雄伟的《东方红》乐曲，是由F调的5 6 7 1 2 3 5 6 i九个音阶组成，他们的频率分别是261.63, 293.66, 329.63, 349.23, 392, 440, 523.25, 587.33和698.46赫。利用振荡电路产生这九个频率的正弦波，再由控制电路让它们按照乐曲所规定的节拍依次出现。这就构成了《东方红》乐曲演奏器。

为了更直观地了解信号的频率组成和特点，我们通常采用图案的方法：用频率 $f$ 作横座标，用信号各正弦分量的幅度作纵座标，这样画出来的图案叫做频谱图。图1—8是《东方红》乐曲的频谱图，其中每一条线段的位置代表某一正弦波的频率，线段的长度代表该正弦波的强弱（如电压振幅）。这种线段叫做谱线。每个信号的最高频率与最低频率之差，也就是这个信号

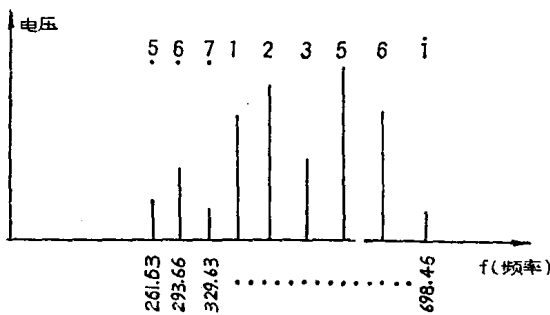


图 1—8 《东方红》音乐信号频谱图

每个信号的最高频率与最低频率之差，也就是这个信号

所拥有的频率范围，叫做该信号的频谱宽度，简称为频宽，也叫带宽。例如上述《东方红》乐曲信号的带宽约为  $(698-261) = 437$  赫。

再来看语音的情况。在1.1节中，图1—2是语音信号电压的波形，它给我们的印象是：变化规律比较复杂，不容易写出数学表达式。但是用频谱的方法来分析它，就不难抓住特点，表达清楚。语音信号的频谱可以用“频谱分析仪”来测量。实验结果表明，语音的频率范围大约在一、二百赫到几千赫之间，在电话通信中规定从300赫到3400赫（或2700赫）为一个话路，一般讲话的主要频率成分落在这个范围里。图1—9示意画出一个话路信号的频谱图。这里，由于语音信号包含的频率成分连续变化，因此谱线画成一片，频带宽度约为  $(3400-300) = 3100$  赫。

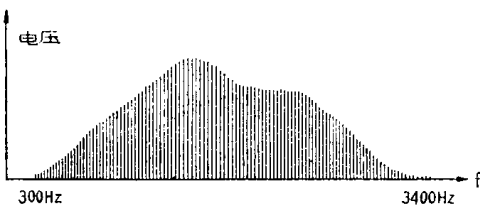


图 1—9 话路信号频谱示意

以后我们还将看到，将语音信号（或任何其它信号）对高频载波进行调制后，所得到的已调信号也可以用频谱分析的方法来示。

现在的问题是：雷达、电视、电报以及数字电路中的脉冲信号，是否也可以用频谱法来分析呢？回答是：完全可以。

以电报信号为例，说明脉冲信号的频谱。在电传打字机等电报系统中，拼音字母 A、B、C、D……以及数字 1、2、3……都是用“1”和“0”两种符号来表示。例如字母“Y”是用 1 0 1 0 1 这样五个符号的组合来代表。这里“1”代表有电流流通，叫做“传号”；“0”代表没有电流，叫做“空号”。字母“Y”的波形可以表示如图 1—10。它的

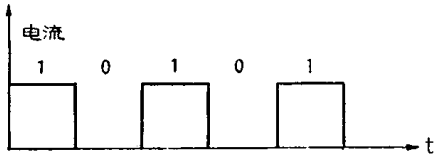


图 1—10 字母 Y 信号波形



是一串脉冲信号。

从表面上看，脉冲信号和正弦波的波形很不一样，但是它们之间有着内在的联系。

为了说明这个问题，让我们来分析重复频率为 $F$ 的矩形脉冲波。图1—11(a)中，我们先用一个直流电流 $I_0$ ，和一个频率 $f_1 = F$ 的正弦波 $i_1$ （叫做基波）来表示上述的矩形脉冲。显然 $I_0$ 与 $i_1$ 相加之后所得的总电流波形 $i$ 与原来的矩形脉冲差别很大。但是，如果再把一个具有相当幅度、而频率 $f_3 = 3F$ 的正弦波 $i_3$ （叫做三次谐波）加上，这样， $I_0 + i_1 + i_3$ 的结果，就和原来的矩形脉冲比较相近了（参看图1—11b）。由此推论，如果再增加五次谐波 $i_5$ 以至七次谐波 $i_7$ ，如图(c)、(d)，叠加起来的信号就更加逼近脉冲信号的波形了。显然，如果选用更多的高次谐波，合成的结果就与脉冲信号一致。由此可见：一个脉冲信号是可以分解为若干个正弦波之和的。图1—12是这种周期性矩形脉冲的频谱图。图中， $f_1$ 表示脉冲重复频率，也就是基波频率。 $3f_1$ 、 $5f_1$ 、 $7f_1$ ……分别表示三、五、七次谐波，在 $f$ 轴的0点，表示直流分量，这条谱线的长度表示脉冲直流分量（即平均值）的大小。高次谐波的谱线可以分布到很高的频率，但其幅度已相当小。实际上周期性矩形脉冲包含有无穷多个谐波分量。也就是说，这种信号的频谱是占据着从0到 $\infty$ 的整个频率范围的。但是，从图1—11可以看出，忽略掉九次以上的谐波，其合成波形仍然和原来的矩形脉冲相当接近。因此在实际应用中，可以根据对误差的要求，忽略高次谐波分量，信号仍然是只占据一段频带。

以上所做的分析是很粗糙的，不够严格。这个问题在数学上早已解决了，这就是数学课中讲到的付立叶级数（三角级数）以及有关资料中所讲的付立叶变换。利用这些数学工具可以帮助我们分析实际应用中各种脉冲信号的频谱，并根据误差条件的要求给出信号所占据的频谱宽度。例如，我国广播电视图象信号的频谱宽度约为6兆赫（由0到6兆赫）左右，其它的脉冲信号的频谱宽度，视脉