

高等学校试用教材

高频电子线路

下 册

(第一分册)

华中工学院无线电技术教研室编

张肃文 主编

人民教育出版社

内 容 提 要

本书系根据1977年11月在合肥召开的全国高等学校工科基础课电工、无线电类教材编写会议所通过的编写大纲编写的,并经1978年12月在武汉召开的审稿会议审查通过,作为高等学校无线电技术类专业的试用教材,也可供从事无线电技术工作的科技人员参考。

本书较详细地介绍了高频电子线路的基本原理和分析方法,引入了一些比较新的内容,注意理论联系实际,各章附有思考题与习题。

全书共十四章,分上、下两册出版。

上册六章,包括绪论、回路与器件的高频特性、高频小信号放大器、非线性电路的分析方法、高频功率放大器、正弦波振荡器。

下册八章,有振幅调制、振幅解调、变频、干扰与噪声(以上为第一分册)、角度调制、调频信号的解调、脉冲与数字调制、频率合成与锁相技术(以上为第二分册)。

本书由华中工学院无线电技术教研室张肃文、王筠、陆兆熊、姚天任分工执笔,张肃文为主编。

本书责任编辑 谭骏云

高等学校试用教材
高 频 电 子 线 路
下 册

(第一分册)

华中工学院无线电技术教研室编

张 肃 文 主 编

*

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

新华书店北京发行所发行

上海市第四印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 10 字数 242,000

1979年12月第1版 1980年6月第1次印刷

印数 00,001—14,300

书号 15012·0218 定价 0.83 元

目 录

第七章 振幅调制	1
§ 7.1 概述	1
§ 7.2 调幅波的性质	7
7.2-1 调幅波的波形	7
7.2-2 调幅波的数学表示式	8
7.2-3 调幅波的频谱	10
7.2-4 调幅波中的功率关系	15
§ 7.3 平方律调幅	16
7.3-1 工作原理	16
7.3-2 场效应管平方律调幅	19
7.3-3 平衡调幅器	20
§ 7.4 差分对振幅调制器	23
§ 7.5 斩波调幅	30
7.5-1 工作原理	30
7.5-2 实现斩波调幅的两种电路	33
§ 7.6 单边带信号的产生	35
7.6-1 单边带通信的优缺点	35
7.6-2 产生单边带信号的方法	37
7.6-3 单边带的几种不同制式	46
§ 7.7 已调波放大	48
§ 7.8 集电极调幅	56
7.8-1 工作原理	57
7.8-2 调制特性	60
7.8-3 功率与效率	63
§ 7.9 基极调幅	69
7.9-1 工作原理	69
7.9-2 工作状态的选择	70
7.9-3 功率与效率	72

§ 7.10	发射极调幅	75
§ 7.11	四、五极管的调幅	77
§ 7.12	多重调制原理	78
	参考资料	84
	思考题与习题	85
第八章 振幅解调(检波)		
§ 8.1	概述	87
8.1-1	检波器的作用和分类	87
8.1-2	对检波器的要求——质量指标	89
§ 8.2	小信号检波(平方律检波)	92
8.2-1	工作原理	92
8.2-2	小信号检波器的主要质量指标和优缺点	94
§ 8.3	大信号检波(峰值包络检波)	96
8.3-1	大信号检波器的工作原理	96
8.3-2	大信号检波器的定量分析	99
8.3-3	大信号检波器的质量指标	103
8.3-4	元件选择与设计原则	113
8.3-5	二极管并联检波器	118
*8.3-6	视频检波和脉冲检波的特点	120
§ 8.4	差拍检波器	125
8.4-1	等幅电报信号的检波	125
8.4-2	差拍检波原理	126
*§ 8.5	单边带信号的接收	130
§ 8.6	乘积检波器	133
8.6-1	乘积检波器的工作原理与应用	133
8.6-2	平衡型乘积检波器及其电路	134
*§ 8.7	自动增益控制	137
8.7-1	接收机进行增益控制的必要性	138
8.7-2	自动增益控制的原理和特性	138
8.7-3	自动增益控制的控制方式	142
8.7-4	AGC 电路设计中的考虑	146
	参考资料	147
	思考题与习题	148

第九章 变频	149
§ 9.1 变频器的作用、工作原理和要求	149
9.1-1 概述	149
9.1-2 变频器的作用	150
9.1-3 变频器的工作原理	155
9.1-4 对变频器的要求(变频器的质量指标).....	159
§ 9.2 晶体管混频器	161
9.2-1 工作原理和电路组态	161
9.2-2 晶体管混频器的分析	162
9.2-3 晶体管混频器和变频器的具体电路以及工作状态的选择.....	177
§ 9.3 二极管平衡混频器和环形混频器	183
9.3-1 二极管平衡混频器的工作原理	184
9.3-2 二极管(单管)开关混频原理	187
9.3-3 二极管平衡混频器开关状态的应用	192
9.3-4 环形混频器(或称双平衡混频器).....	194
9.3-5 分裂式平衡混频器	199
§ 9.4 场效应管混频器	202
9.4-1 场效应管单管混频器	202
9.4-2 场效应管平衡混频器	209
§ 9.5 差分对混频器	213
*§ 9.6 统一调谐	215
参考资料	220
思考题与习题	220
第十章 干扰与噪声	222
§ 10.1 概述	222
§ 10.2 外部干扰	223
10.2-1 工业干扰	224
10.2-2 天电干扰	227
10.2-3 组合频率干扰(干扰哨声)和副波道干扰.....	228
10.2-4 交叉调制(交调)	234
10.2-5 互相调制(互调)	238
10.2-6 阻塞干扰	240
10.2-7 相互混频(或称“倒易混频”、“噪声调制”).....	243

10.2-8	克服外部干扰的措施	245
*§ 10.3	内部噪声的基本知识和表示法	256
§ 10.4	内部噪声	263
10.4-1	电阻热噪声	263
10.4-2	天线热噪声	267
10.4-3	晶体管的噪声	270
10.4-4	场效应管的噪声	275
10.4-5	噪声系数与噪声温度	276
10.4-6	等效噪声频带宽度	281
10.4-7	多级放大器的噪声系数	286
10.4-8	输入回路与晶体管放大级的噪声系数	287
10.4-9	场效应管放大级的噪声系数	293
10.4-10	减小噪声系数的措施	295
10.4-11	接收机的实际灵敏度	298
10.4-12	噪声系数的测量	301
附录 10.1	共发射极混合 π 型等效电路与共基 T 型等效电路的转换	306
附录 10.2	对几种主要干扰指标的建议(国际电信联盟 CCIR 提出)	
	和测试方法	309
参考资料		312
思考题与习题		313

第七章 振幅调制

§ 7.1 概 述

传输信息是人类生活中的一个极其重要的内容。传输信息的手段是很多的，这在绪论一章中已简略叙及。利用无线电技术来进行信息传输在这些手段中占有极其重要的地位。无线电通信、广播、电视、导航、雷达、遥控遥测等等，都是利用无线电技术传输各种不同信息的方式。无线电通信传送语言、电码、或其它信号；无线电广播传送语言、音乐等；电视传送图像、语言、音乐；导航是利用一定的无线电信号指引飞机或船舶安全航行，以保证它们能平安到达目的地；雷达是利用无线电信号的反射来测定某些目标（如飞机、船舶等）的方位；遥测遥控则是利用无线电技术来量测远处或运动体上的某些物理量，远程控制远处机件的运行等。在以上这些信息传递的过程中，都要用到调制与解调。

在绪论中已经简略说明，所谓调制，就是在传送信号的一方（发送端）将所要传送的信号（它的频率一般是较低的）“附加”到高频振荡上，再由天线发射出去。在这里，高频振荡波就是携带信号的“运载工具”，所以也叫“载波”。

在接收信号的一方（接收端）则要经过解调（反调制）的过程，把载波所携带的信号取出来，得到原有的信息。反调制过程也叫检波。

调制与解调都是频谱变换的过程，必须用非线性元件才能完成^①，这在第四章中已讲过了。

^① 在某些特殊情况下，也可以利用线性电路来产生频率变换作用，例如，本章 § 7.4 节的差分对振幅调制器就是这样。

我们自然会提出这样的问题：难道不能够直接把信号发射出去吗？为什么一定要经过调制的过程？这里的关键问题是所要传送的信号频率或者太低（例如言语和音乐都限于音频范围内），或者频带很宽（例如电视信号频宽从 50 赫至 6.5 兆赫）。这些都对直接采用电磁波的形式来传送信号十分不利，原因是：

1) 天线要将低频信号有效地辐射出去，它的尺寸就必须很大。例如，频率为 1000 赫的电磁波，其波长为 300,000 米，即 300 公里。如果采用 $1/4$ 波长的天线，则天线的长度应为 75,000 米，相当于 150 华里。不用说，实际上这是难于办到的。

2) 为了使发射与接收效率高，在发射机与接收机方面都必须采用天线及谐振回路。但语言、音乐、图像信号等的频率变化范围很大，因此天线和谐振回路的参数应该在很宽范围内变化。显然，这又是难于做到的。

3) 如果直接发射音频信号，则发射机将工作于同一频率范围。这样，接收机将同时收到许多不同电台的节目，无法加以选择。

为了克服以上的困难，必须利用高频，将低频信号“附加”到高频上。这样，就使天线的辐射效率提高，尺寸缩小；同时，每个电台都工作于不同的载波频率，接收机可以调谐选择不同的电台。这就解除了上述的种种困难。

所谓将信号“附加”到高频振荡上，应该是利用信号来控制高频振荡的某一参数，使这参数随信号而变化。这就是调制。绪论中已指出，调制的方式可分为连续波调制与脉冲波调制两大类。连续波调制是用信号来控制载波的振幅、频率或相位，因而分为调幅、调频或调相三种方法。脉冲波调制是先用信号来控制脉冲波的振幅、宽度、位置等，然后再用这已调脉冲对载波进行调制。脉冲调制有脉冲振幅、脉宽、脉位、脉冲编码调制等多种形式。本章只讨论调幅，第十一章则讨论调频与调相，第十三章讨论脉冲与数

字调制。

对于各种不同的调制方式和实现调制的方法进行比较时，应从以下几项指标来考虑：

1) 抗干扰性 在无线电信号的传送过程中，不可避免地要受到各种干扰的影响，因此通信距离和通信的可靠性在很大程度上决定于通信方式的抗干扰能力。干扰对于信号的影响视其强度、性质以及波段而定。在使用不同的调制方法时，这个影响也是不同的。一般说来，脉冲编码调制(PCM)^①的抗干扰能力最强，调频与调相次之，调幅的抗干扰能力最弱。

2) 实现调制的简便程度 从这方面来说，调幅最易实现，脉冲编码调制等方法则复杂得多。

3) 已调波信号所占的频带宽度 使用不同的调制方法来发射同样的信号，所占据的频带宽度是不同的。调幅制所占的频带宽度等于信号最高频率的两倍，属于窄带调制。脉冲调制或宽带调频等所占的频带宽度则大大超过最高信号频率，这些属于宽带调制。

4) 电子器件的效率和输出功率 在不同的调制方法中也互不相同。

5) 信号在接收设备中还原的保真度 按理说，各种调制方法都可以保证达到所要求的保真度，但实施调制的简便程度以及发射机的大小和重量却有所不同。

在选择调制方式与方法时，要全面综合考虑。例如，调幅制适用于长、中、短与超短波段，接收设备最简单，因而广泛用于无线电广播。调频制抗干扰能力强，但由于频带宽，因而只适用于超短波段，如通信、电视伴音等。

^① PCM 为 Pulse Code Modulation 的缩写，见第十三章。

为了判断调幅发射机的信号传送质量，可用以下几个指标来说明：

- 1) 调制特性(非线性失真)；
- 2) 调制的频率特性(线性失真)；
- 3) 噪声电平。

调制特性可以用静态调制特性曲线与动态调制特性曲线来描述。

所谓静态调制曲线，就是集电极高频电流 I_{c1} 与各电极直流电压的关系。例如集电极调制是利用音频调制信号电压来控制集电极电压，使集电极输出的高频电流 I_{c1} 发生变化，来获得已调波输出(详细讨论见 § 7.8 节)。它的静态调制特性就是如图 7.1-1 所示的 $I_{c1}=f(V_c)$ 的关系曲线。在求静态调制特性时，没有加入

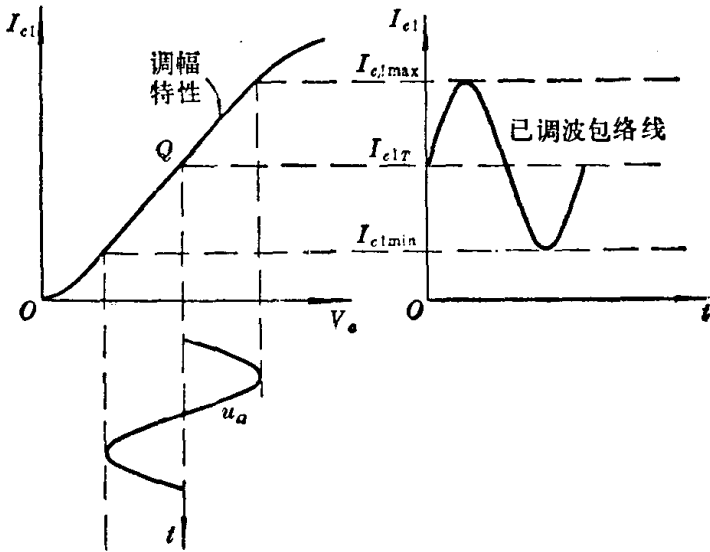


图 7.1-1 集电极调幅静态特性曲线以及如何用它来正确选定工作点

音频调制电压 U_m ，而是通过逐步改变集电极直流电压来代替 U_m 所起的作用，逐点求出 I_{c1} 的大小。由于这时不是真正的调制过程，因而没有边频存在，输出中只有载波频率，也就不存在集电极

谐振回路对边频的失调问题。因此，静态调制特性曲线不能完全反映实际的调制过程。但通常调制信号角频率 Ω 要比载波角频率 ω_0 低得多，因此对载波来说，调制信号的变化是很缓慢的，可以认为是直流变化。这样，静态调制特性曲线仍然能正确反映调制的过程。我们可以利用它来确定已调波包络的非线性失真的大小。由图 7.1-1 显然可知，为了减小非线性失真，静态工作点 Q 应选在调制特性曲线直线段的中央。工作点过高或过低，都会使已调波产生包络失真。

所谓动态调制特性曲线是在调制频率不变(一般取为 400 或 1000 赫)的情况下，改变调制电压 U_o 的振幅所得到的调幅度 m_a 与调制电压振幅之间的关系曲线，如图 7.1-2 所示。一般可用它来衡量调幅时的包络失真(非线性失真)。对于广播发射机来说，它对非线性失真的要求很严格。在调制度为 100%、调制频率为 1000 赫时，允许的非线性失真系数一般为 2~3%。对于通信机来说，要求要低一些。通常在 $m_a=80\sim 95\%$ 时，非线性失真系数应小于 10%。

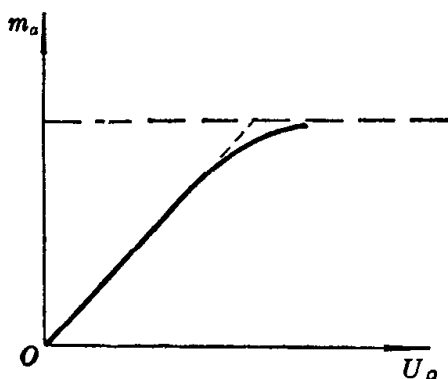


图 7.1-2 动态调制特性曲线

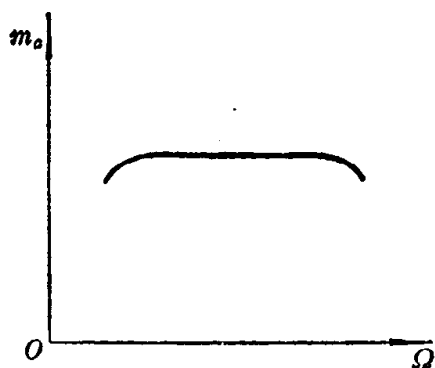


图 7.1-3 频率特性曲线

如果维持调制电压振幅不变，改变调制频率 Ω 所得到的调幅度与调制频率之间的关系曲线，称为频率特性曲线，如图 7.1-3 所

示。这条曲线可用来衡量已调波的频率失真。由于频率失真一般是由电路中的线性元件(电容、电感等)所引起的,所以它也叫线性失真。

噪声电平一般定义为没有调制信号时,由于噪声所产生的寄生调幅度与信号最大时的调幅度之比,后者往往取为1。在广播发射机中,允许的噪声电平约为0.1%,即噪声所产生的寄生调幅度比信号所产生的最大调幅度应低60分贝。在通信机中,这一指标可以低一些。

最后,我们简略介绍一下实现调幅的方法,它大约有下列几种:

1. 低电平调幅 调制过程是在低电平级进行的,因而需要的调制功率小。属于这种类型的调制方法有:

1) 平方律调幅 利用电子器件的伏安特性曲线平方律部分的非线性作用来进行调幅。

2) 斩波调幅 将所要传送的音频信号按照载波频率来斩波,然后通过中心频率等于载波频率的带通滤波器来滤波,取出调幅成份。

3) 模拟乘积调幅 这是利用输出等于两个输入信号乘积的电路,来实现调幅的。

2. 高电平调幅 调制过程在高电平级进行,通常是在丙类放大器中进行调制。属于这一类型的调制方法有:

1) 集电极(阳极)调幅;

2) 基极(控制栅极)调幅。

由于调制的过程是把信号从低频移到载波频率两侧的频率搬移过程,必须采用非线性元件才能实现。因此,以上几种调幅都是用非线性器件(晶体管或电子管)完成的。在研究各种调幅方法之前,我们应先复习调幅波的基本性质,作为本章的基础。

§ 7.2 调幅波的性质

7.2-1 调幅波的波形

我们已经知道，调制的过程就是使高频振荡(载波)的某一参数(振幅、频率或相位)随着所要传送的信号变化规律而变化，以此

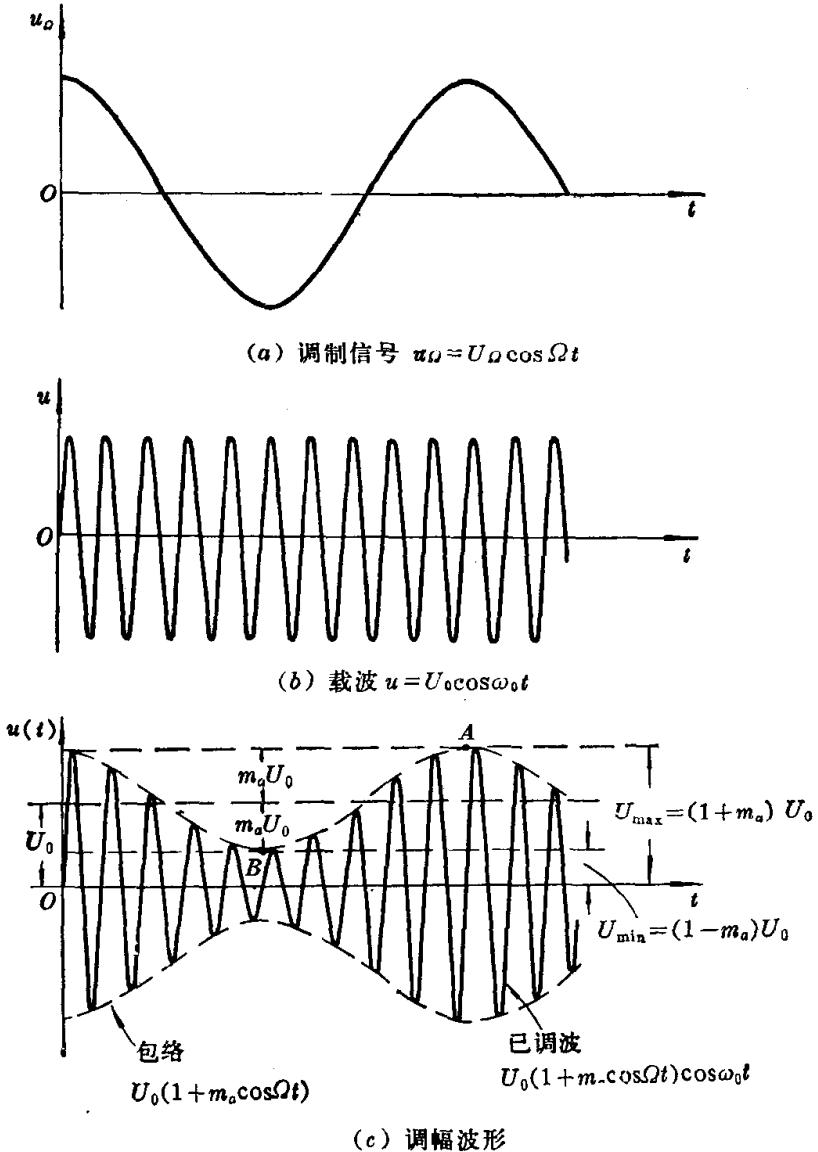


图 7.2-1 调幅波的形成(正弦调制)

达到传送信号的目的。经过调制后的高频波(已调波),它的波形和频谱都与原来的载波不同,因此调制的过程也就是波形和频谱变换的过程。所谓调幅,就是使载波的振幅随着调制信号的变化规律而变化。例如图 7.2-1 就是当调制信号是正弦波形^①时,调幅波的形成过程。由图可以看出,调幅波是一个载波振幅按照调制信号的大小成线性变化的高频振荡。它的载波频率维持不变,也就是说,每一个小波之间的时间间隔是相等的,因而波形的疏密程度均匀一致,与未调制时的载波波形疏密程度相同。

应该说明,通常所要传送的信号(如语言、音乐等)的波形是很复杂的,包含了许多频率。但为了简化分析手续起见,在以后分析调制时,可以认为信号是正弦波形。因为复杂的信号可以分解为许多正弦波分量之和,因此,只要已调波能够同时传送许多不同调制频率的正弦调制信号,那么,复杂的调制信号也就如实地被传送出去了。

7.2-2 调幅波的数学表示式

由上节的简述已知,调幅波的特点是载波的振幅受调制信号的控制作周期性的变化。这变化的周期与调制信号的周期相同,而振幅变化则与调制信号的振幅成正比。现在我们就来进一步分析它的特点。

为简化分析手续起见,假定调制信号为简谐振荡波,其表示式为

$$u_{\Omega} = U_{\Omega} \cos \Omega t \quad (7.2-1)$$

如果用它来对载波 $u = U_0 \cos \omega_0 t$ 进行调幅,那么,在理想的情况下,这已调波的振幅应为

$$U(t) = U_0 + k_a U_{\Omega} \cos \Omega t \quad (7.2-2)$$

^① 正弦函数与余弦函数的性质相同,因此由它们所表示的波形可统称为正弦波,不必加以区别。

式中 k_a 为比例常数。

因此,已调波可以用下式表示:

$$\begin{aligned} u(t) &= U(t) \cos \omega_0 t \\ &= (U_0 + k_a U_D \cos \Omega t) \cos \omega_0 t \\ &= U_0 (1 + m_a \cos \Omega t) \cos \omega_0 t \end{aligned} \quad (7.2-3)$$

式中 $m_a = \frac{k_a U_D}{U_0}$ 叫做调幅指数或调幅度, 它通常以百分数来表示。

式(7.2-3)所表示的调幅波形见图 7.2-1。由图可得

$$m_a = \frac{\frac{1}{2}(U_{\max} - U_{\min})}{U_0} = \frac{U_{\max} - U_0}{U_0} = \frac{U_0 - U_{\min}}{U_0} \quad (7.2-4)$$

m_a 的数值范围可自 0(未调幅)至 1(百分之百调幅), 它的值绝对不应超过 1。因为如果 $m_a > 1$, 那么, 将得到如图 7.2-2 的已调波

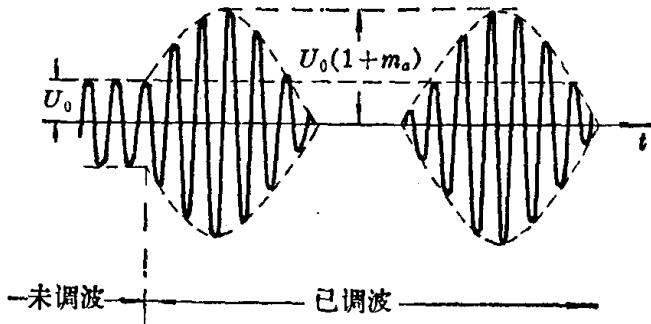


图 7.2-2 过量调幅的波形

形。由图显然可知, 有一段时间振幅为零, 这时已调波的包络产生了严重的失真。这种情形叫做过量调幅。这样的已调波经过检波后, 不能得到原来调制信号的正弦振荡波形, 而且它所占据的频带较宽, 将会对其它电台产生干扰。因此, 过量调幅必须尽力避免。

通常所要传递的调制信号波形是极不规则的。假设它的波形如图 7.2-3(a)所示, 那么, 当它作为调制波时, 所得到的调幅波形

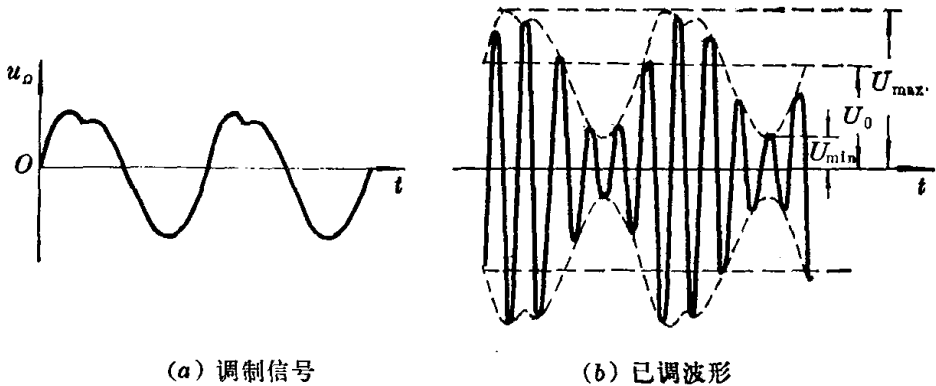


图 7.2-3 由非正弦波调制所得的调幅波形

应如图(b)所示。由于调制波不对称，以致使调幅波峰值 U_{max} 与谷值 U_{min} 对于载波值 U_0 也是不对称的。这时必须对它的调幅度定义如下：

$$\text{峰值调幅度} \quad m_{\pm} = \frac{U_{max} - U_0}{U_0} \quad (7.2-5)$$

$$\text{谷值调幅度} \quad m_{\mp} = \frac{U_0 - U_{min}}{U_0} \quad (7.2-6)$$

当调制信号上下对称时， $m_{\pm} = m_{\mp}$ 。

7.2-3 调幅波的频谱

由图 7.2-1(c)可知，调幅波不是一个简单的正弦波形。在最简单的正弦波调制情况下，调幅波方程为式(7.2-3)。将此式展开得

$$\begin{aligned} u(t) &= U_0 \cos \omega_0 t + m_a U_0 \cos \Omega t \cos \omega_0 t \\ &= U_0 \cos \omega_0 t + \frac{1}{2} m_a U_0 \cos (\omega_0 + \Omega) t \\ &\quad + \frac{1}{2} m_a U_0 \cos (\omega_0 - \Omega) t \end{aligned} \quad (7.2-7)$$

式(7.2-7)说明，由正弦波调制的调幅波是由三个不同频率的正弦波组成的：式中第一项为未调幅的载波；第二项的频率等于载

波频率与调制频率之和,叫做上边频(高旁频);第三项的频率等于载波频率与调制频率之差,叫做下边频(低旁频)。后两个频率显然是由于调制产生的新频率。把这三组正弦波的相对振幅与频率的关系画出来,就得到如图 7.2-4 所示的频谱图。由于 m_a 的最大值只能等于 1,因此边频振幅的最大值不能超过载波振幅的二分之一。

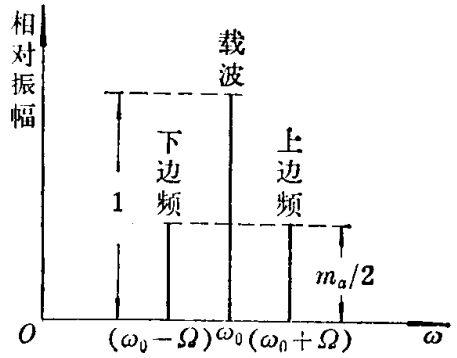


图 7.2-4 正弦调制的调幅波频谱

以上讨论的是一个单音信号对载波进行调幅的最简单情形,这时只产生两个边频。实际上,通常的调制信号是比较复杂的,含有许多频率,因此由它所产生的调幅波中的上边频和下边频都不再只是一个,而是许多个,组成了所谓上边频带与下边频带。例如,设调制信号为

$$u_a = U_1 \cos \Omega_1 t + U_2 \cos \Omega_2 t + U_3 \cos \Omega_3 t + \dots \quad (7.2-8)$$

根据获得式(7.2-3)的同样方法,可以得出相应的调幅波方程为

$$\begin{aligned} u(t) &= U_0 (1 + m_1 \cos \Omega_1 t + m_2 \cos \Omega_2 t + m_3 \cos \Omega_3 t + \dots) \cos \omega_0 t \\ &= U_0 \cos \omega_0 t + \frac{m_1}{2} U_0 \cos (\omega_0 + \Omega_1) t + \frac{m_1}{2} U_0 \cos (\omega_0 - \Omega_1) t \\ &\quad + \frac{m_2}{2} U_0 \cos (\omega_0 + \Omega_2) t + \frac{m_2}{2} U_0 \cos (\omega_0 - \Omega_2) t \\ &\quad + \frac{m_3}{2} U_0 \cos (\omega_0 + \Omega_3) t + \frac{m_3}{2} U_0 \cos (\omega_0 - \Omega_3) t \\ &\quad + \dots \end{aligned} \quad (7.2-9)$$

以上的讨论可以用图 7.2-5 所示的频谱图来表示。图中 $g(\Omega)$ 代表式(7.2-8)的频谱;调幅波的两个边频带的频谱分布对载波是