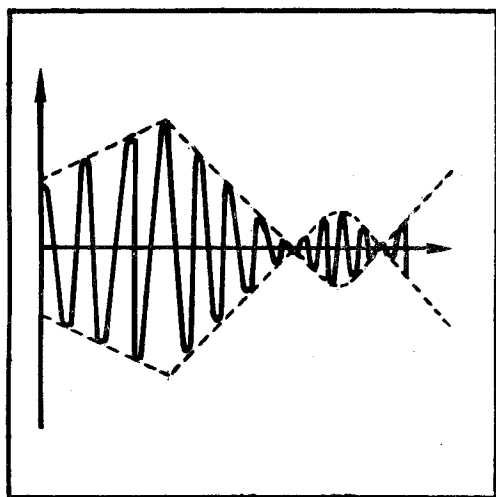


通信新技术普及丛书

单边带 调幅通信

张树京 冯锡生 编

周大纲 审校



中国铁道出版社

内 容 简 介

本书为“通信新技术普及丛书”中的一个分册，着重介绍调幅通信和单边带调幅通信技术。主要内容有幅度调制，单边带幅度调制，单边带收、发信机，以及通信用频率合成器等。

本书为科普读物，内容通俗易懂，可供具有高中以上文化程度的通信技术人员和工人学习参考。

通信新技术普及丛书

单边带调幅通信

张树京 冯锡生 编

周大纲 审校

中国铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 $\frac{1}{32}$ 印张 6 字数：137千

1985年10月 第1版 第1次印刷

印数：0001—3,500册 定价：1.10元

前 言

当前世界正面临着一场新技术革命的挑战，它的核心是大力发展和推广信息技术，其中包括信息的采集、处理、传递、存储以及控制等。通信技术从本质上讲就是完成信息传递的功能，它要将有用信息无失真、高效率地进行传递和交流，同时要在传递过程中将无用信息（噪声）和有害信息（干扰）抑制掉。

自从人类进入文明社会以来，对通信的要求越来越高，通信技术也就逐渐由低级向高级阶段发展。真正的通信技术是从十九世纪开始的，那时最重大的发明是电，因此将信息传递与电结合起来后才构成近代通信（或称“电信”）的基础。

十九世纪在通信技术发展史上是处于萌芽阶段，在这段期间的重大发明有莫尔斯的电报，贝尔的电话，麦克斯韦的电磁场理论，赫兹的电磁波试验，以及波波夫和马可尼的无线电试验等。这些发明为通信技术的发展奠定了可靠坚实的基础。

进入二十世纪以来，通信技术发生了重大变化，其中最主要的是电子器件的大发展，传输线路的现代化，调制方式多样化，以及通信业务不断更新。例如在将近半个世纪期间，电子器件经历了电子管、晶体管、集成电路以及大规模集成电路等四个时代，目前正向超大规模集成电路的方向发展。传输线路从架空明线发展到对称电缆、同轴电缆、微波线路、卫星通信线路以及最新的光纤通信线路，逐步实现传输线路的现代化。在通信业务方面也充实了许多新的内容，从早期的电报电话发展到广播、传真、电视，以及现代的数

据传输、计算机通信、图象通信等，更好地为信息社会提供完善的通信工具。

在调制技术方面也是经历了不同的发展阶段。最早是调幅制，它的优点是技术简单，并且接收调幅波最容易。但其缺点是抗干扰性能差，因此不能保证良好的通信质量。后来发展调频制，它解决了抗干扰的问题，但是由于它要占用比较宽的传输频带，因此只能在超短波或微波频段内使用，特别是在有线通信内无法实现。与此同时，还有人提出采用脉冲调制，但实践证明它的抗干扰性能也不好。目前受到重视的是单边带调幅技术和数字脉冲调制(包括脉码调制和增量调制)。

单边带调幅技术是从调幅制中派生出来的，它的突出优点是占用传输频带最窄，因此频带利用率最高；同时它又具有良好的抗干扰性能，可以与调频制相媲美。因此它被公认为目前最理想的模拟调制方式，除了在有线通信内广泛应用外，现已发展到短波和微波通信内采用单边带调幅制。至于脉码调制和增量调制都是属于数字调制技术，它们也有很好的性能，读者可在其它资料内查阅。

本书旨在介绍单边带调幅技术。为了使读者便于掌握单边带调制的特点和性能，有必要先介绍一下调幅制的原理，并从中引出单边带调制来。除了介绍单边带调制的一般性原理外，本书还着重分析单边带收、发信机的组成和典型电路介绍，同时对通信用的频率合成器也进行了比较详细的分析，它是实现单边带调幅通信的一个关键部分。

由于编者水平所限，书中难免有缺点和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

一九八四年六月

目 录

第一章 幅度调制.....	1
第一节 为什么要调制.....	1
第二节 什么是幅度调制.....	5
第三节 幅度调制的特点是什么.....	11
第四节 怎样产生调幅波.....	19
第五节 怎样对调幅波进行解调.....	29
第六节 调幅收、发信机举例.....	36
第二章 单边带调制.....	40
第一节 什么是单边带调制.....	40
第二节 单边带调制的优缺点.....	50
第三节 怎样产生单边带信号.....	59
第四节 怎样解调单边带信号.....	66
第五节 单边带通信的种类.....	68
第三章 单边带收、发信机.....	75
第一节 单边带发信机的组成.....	75
第二节 边带滤波器.....	85
第三节 线性放大器.....	97
第四节 单边带收信机的组成.....	110
第五节 前端电路.....	122
第六节 自动增益控制.....	129
第四章 通信用频率合成器.....	136
第一节 对频率合成器的技术要求.....	136
第二节 直接法频率合成器.....	142

第三节	间接法频率合成器·····	150
第四节	主振频率源·····	160
第五节	谐波发生器·····	164
第六节	鉴相器·····	167
第七节	压控振荡器·····	173
第八节	程序分频器·····	176

第一章 幅度调制

调制技术在通信学科中是非常重要的一个内容。选择不同的调制方式往往就决定了一个通信系统的性能，而某种新的调制方式的出现也将使通信系统发生根本性的变化。因此，对于从事通信工作的科技人员和学习通信技术的同志来说，熟练地掌握调制技术是必不可少的。

由于调制的种类繁多，内容很丰富，本书将不一一介绍，主要介绍单边带幅度调制（简称“单边带调制”）。

第一节 为什么要调制

首先遇到的一个问题是信号传输为什么要调制？也就是说采用调制技术有什么好处？

在回答这个问题之前，让我们先观察一下现有的各类通信系统。

总的来说，通信系统可以分为两大类，其中一类称为“基带传输系统”，另外一类称为“通带传输系统”。

所谓“基带传输”是指信号（包括语音、广播、传真、电视、数据等）不经过任何调制就在信道内直接传输，这样的传输信号也可称为“基带信号”。根据信号分析理论可知，任何信号都可以通过傅里叶变换，分解为许多频率分量的组合，并将它称为“信号频谱”。因此，一个信号既可在时间域内用波形（或时间函数）来表示，又可在频率域内用频谱（或频率函数）来表示，它们是完全等效的。基带信号的特点就是其频谱成分往往从零频（即直流分量）或很低的

频率开始，直到比较高的频率。例如，基带电视信号的频谱就是从零频一直到 6 MHz 左右，占用很宽的频带。数据信号（包括电报在内）的频谱也是从零频开始。另一类基带信号的频谱是从很低的频率开始，例如语音信号的频谱是 300 ~ 3400 Hz，广播信号的频谱可认为是 20 Hz ~ 15 kHz 等。总之，基带传输系统要求信道具有从零频或很低频率开始的有效传输频带，在此频带内保证传输信号不致失真。这样的信道也可称为“基带信道”。拿架空明线 and 对称电缆来说，就属于这样的信道，因此可以直接传输语音信号或低速的数据信号。目前，我们所用的市内电话或者基带数据传输都是属于基带传输的通信系统。

但是基带传输在通信系统中是属于少数，并且仅在距离不长、通信质量要求不高的情况下使用。在通信系统中，大量使用的是通带传输系统，它就是指信号经过一次或几次调制后再往信道内传输，这样的信道也可称为“通带信道”。例如，同轴电缆虽然它的高频性能很好，但是在低频段内的线路损耗很大，它就不适于传输基带信号。但是，经过调制后可以将信号频谱搬移到同轴电缆最合适的有效频带内传输，可使通信系统获得良好的通信质量。又如，无线通信也无法传输基带信号，因为天线是通不过直流和低频信号的。根据天线辐射理论可知，为了充分发挥天线的辐射能力，要求天线的长度必须在发射信号频率的 $\frac{1}{4}$ 波长以上。假定基

带信号的频率是 1 kHz，它在自由空间传播的波长就等于 300 km，因此要想将这个低频信号直接用天线来发射，则要求天线长度必须在 75 km 以上，实际上这是不可能做到的。这就说明，基带信号不经过调制是无法利用无线信道的。目前，我们收到的无线电广播节目就是经过调制以后的信号。

例如，将收音机调到中波段1000kHz的中央人民广播电台，它就是将基带信号搬移到1000kHz频率（即电台发射频率）后再通过天线发射出来的。显然，发射频率越高，波长就越短，因此天线的尺寸也就可以相应地减小。例如，作为汽车调度用的无线电台，使用超短波频率150MHz或400MHz，因此它的天线长度只要0.5m或更短就行了，这样才有实用意义。我们可以这样说，所有的无线通信都是通带传输系统，不经过调制是不能使用这些信道的。

到现在为止，我们已经可以看到，无论是有线通信还是无线通信，都大量地属于通带传输系统，而它的最明显的标志就是要采用调制技术。属于近代通信方式的光纤通信和卫星通信更是离不开调制，并且往往是要经过几次调制以后才能送往这些信道。

在介绍了这两类通信系统以后我们就可知道，没有经过调制的基带信号只能在基带信道内传输，这是少量的；而经过调制后的通带信号才能在通带信道内传输，这是大量的。目前长距离、高质量的通信系统都属于后者，由此可以看出调制技术在通信中的重要地位。否则，大量优质的通带信道（包括有线和无线的）都无法利用，更谈不到开辟新的通信领域了。

以上只是谈到了调制功能的一个方面，即将信号与传输信道的特性密切地配合起来，能提高通信的质量。调制功能的另一方面就是可以实现信道复用。

所谓“信道复用”就是在信道容量有余的情况下，利用调制技术将信道同时或轮流地提供给多路信号传输使用。例如，同轴电缆能够传输的有效频带很宽，它大大地超过了一路语音信号所需占用的频带。因此，可以通过调制技术将各路语音信号的频谱搬移到不同的工作频率上去，并使它们排

列起来，组成一个很宽的多路信号频谱，然后送到同轴电缆上去传输。载波通信系统就是利用这个工作原理，以达到多路复用的目的。这种复用技术称为“频率复用”，目前已经得到广泛应用。

另外一类常用的复用技术称为“时间复用”。它是将各路信号的取样值轮流地送入信道，在接收端只要保持严格同步，就可以将各路信号分开。由于取样值间隔很小，对于用户来说感觉不到所传输的信号在时间上是离散的，因此并不影响通信质量。所有的脉冲调制都属于时间复用的范畴，无论在有线通信或无线通信中应用都很广泛，尤其是在发展数字通信设备时更不可缺少。

当然除了频率复用和时间复用以外，还有其它调制方式可以实现新的信道复用。这说明为了充分利用信道的传输能力，提高信道的复用率，就必须利用调制技术。这是调制功能的另一表现。

调制技术的第三个用途是提高信号传输的抗干扰能力。因为调制后的信号在接收端解调器里可以利用各种信号处理方法，将叠加在信号波形上的噪声影响清除干净，而对没有经过任何调制的基带信号来说则不能。例如，采用音频调制的交流电报就比没有经过调制的直流电报抗干扰性能好。又如，我们在收音机中接收调频电台广播节目就要比调幅电台清晰悦耳，这是因为鉴频器的抗干扰能力比普通检波器要强。再如，采用数字调制要比模拟调制的抗干扰性能好，因为在数字通信系统中利用中继再生的原理，可以防止噪声积累，而在模拟调制时是无法做到的。这些例子都是说明，采用调制技术可以提高抗干扰能力，而且不同的调制方式所产生的抗干扰效果也不同。因此，在设计通信系统的时候必须根据信道情况和对通信质量的要求，合理地选择好调制方式，这是

很关键的一个问题。这里顺便指出,不同调制方式的抗干扰能力往往与有效传输频带构成一对矛盾,即抗干扰性能好的调制方式(例如调频)要求传输频带比较宽。因此在考虑抗干扰性的同时又必须兼顾到传输带宽,这个问题在信息论中称为传输的可靠性和传输的有效性之间的“矛盾”。研究这个问题是通信学科发展的核心,无论过去还是现在,它都成为许多通信工作者关心的课题。

到这里为止,我们已经举例说明了调制技术在通信系统中的三个功能,这就是信号与信道特性的配合,实现信道复用(提高传输有效性),以及改善抗干扰性能(提高传输可靠性)。这些功能对于实现一个高质量的通信系统来说是缺一不可的,因此现在我们就回答了为什么信号传输必须经过调制过程这个问题。当然在后面我们还会涉及到调制技术的各方面性能,它们的优缺点等,并将结合具体的调制方式来加以分析。

第二节 什么是幅度调制

所谓“调制”就是将所要传输的信息依附在某个特定信号的一个参数上,这个特定的信号通常称为“载波”。我们可以举一个通俗的例子来作比喻,这就象穿着各色服装的男女青年进行骑马旅行一样。这里马匹就相当于调制用的载波,而马背就是它的一个参数。人骑到马背上相当于调制过程,经过旅行后再从马背上跳下来就相当于解调过程。因此,整个骑马旅行就相当于通信系统的全过程,不过这里不是两地交换信息,而是骑马人由甲地旅行到乙地。很明显,在骑马旅行中的马匹只是起到运载工具的作用,骑马人由甲地搬到乙地并没有丝毫改变。但是如果没有马匹做运载工具,长途旅行就不可能实现,骑马人也就无法从甲地旅行到

乙地。这说明马匹在骑马旅行中的作用，它既不改变骑马人的特色，但也缺它不可。在通信系统中载波的作用也很相似，它对信息交换本身不起什么作用，但是如果经过利用载波的调制和解调过程，交换信息也有困难，甚至无法实现。因此，调制过程就是把信息寄存于载波的一个参数中进行传输的过程。被调制后的信息到达接收端，再经解调过程把原信息恢复出来。

那么用什么特定的信号可以作为载波呢？理论上讲，任何波形的信号都可以用作载波，但实际应用的载波信号只有两种。其中，最常用的是单频正弦（或余弦）波，因为它在时间上是连续的，故利用这类载波信号的调制就称为“连续波调制”，例如调幅和调频等。另外一类常用的载波是窄脉冲，它在时间上是离散的，故它与连续波作为载波是完全不同的。我们将利用窄脉冲作载波的调制称为“脉冲调制”，它包括脉位调制、脉码调制、增量调制等。显然，由于所用的载波不同，调制方式也就不同*，调制后信号的传输性能也不一样。这是在设计通信系统时首先需要考虑的问题。本书阐述的单边带调幅通信就是连续波调制的一种情况。

大家知道，作为载波的单频正弦（或余弦）波具有三个基本参数，即幅度 A 、频率 f 和相位 θ 。我们可以用三角公式来表示为

$$c(t) = A \cos(\omega t + \theta) \quad (1-1)$$

式中 $\omega = 2\pi f$ ——角频率。

这里 $c(t)$ 就是载波，它是个时间函数。如果用调制信号（即所要传输的信息）来改变 A 、 ω 或 θ 中的任何一个参数，就可实现连续波调制。

假定取 $\omega = \omega_0$ 和 $\theta = \theta_0$ 均为固定不变的常数，而用 $A(t)$

* 调制方式不同不仅决定于载波不同，而且也与调制信号本身有关。

$= A_0 + f(t)$ 来表示可变的幅度，则公式 (1—1) 将变成

$$\begin{aligned} s(t) &= [A_0 + f(t)] \cos(\omega_0 t + \theta_0) \\ &= A(t) \cos(\omega_0 t + \theta_0) \end{aligned} \quad (1-2)$$

其中 A_0 ——常数，代表直流分量；

$f(t)$ ——交流信号，代表要传输的信息。

由此可见， $s(t)$ 已经不是原来的载波了，因为在它的幅度变化中已经反映了所要传输的信号 $f(t)$ ，也就是进行了调制。由于这里的调制是利用载波 $c(t)$ 的幅度参数 A ，因此称它为“幅度调制”，或简称“调幅”，可用 AM 来表示。

同样道理，如果所要传输的信号 $f(t)$ 不是改变载波的幅度 A ，而是改变它的角频率 ω ，则称为“频率调制”，或简称“调频”，用 FM 来表示。如果 $f(t)$ 改变的是载波的相位 θ ，则称为“相位调制”，简称“调相”，用 PM 来表示。不过调频波和调相波的表达式要比调幅波复杂，本书不予介绍。

为了进一步加深对调幅波的理解，我们可将调制信号 $f(t)$ 简化为一个单音信号，即频率为 F 的正弦（或余弦）波。此时式 (1—2) 变成

$$s(t) = [A_0 + A_m \cos \Omega t] \cos(\omega_0 t + \theta_0) \quad (1-3)$$

其中 A_m ——单音信号的幅度；

$\Omega = 2\pi F$ ——单音信号的角频率。

这里要注意，角频率 ω_0 和 Ω 是两个完全不同的概念。 ω_0 代表载波的角频率，它的大小决定了调幅波的工作频率高低，例如广播电台使用什么频率播音就决定于 ω_0 的大小。而 Ω 则代表调制信号的角频率，它的大小与播音节目的内容有关，例如女高音的 Ω 值就比较大，而男低音的 Ω 值比较小。因此，我们应将它们严格区分开，实际上总是 $\omega_0 \gg \Omega$ 。

式 (1—3) 又可写成另外一种形式为

$$s(t) = A_0 \left[1 + \frac{A_m}{A_0} \cos \Omega t \right] \cos(\omega_0 t + \theta_0) \quad (1-4)$$

通常再利用调幅系数 m 的概念，它等于

$$m = \frac{A_m}{A_0} \quad (1-5)$$

则式 (1-4) 变成

$$s(t) = A_0 [1 + m \cos \Omega t] \cos(\omega_0 t + \theta_0) \quad (1-6)$$

这是表达调幅波的常见形式。

为了便于画出调幅波的波形，我们可将式 (1-6) 看作是由两部分相乘而成，其中一部分是

$$A(t) = A_0 [1 + m \cos \Omega t] \quad (1-7)$$

它称为“调幅波的包络”，另一部分就是 $\cos(\omega_0 t + \theta_0)$ ，它可看作幅度为 1 的载波。因此，式 (1-6) 又可写成

$$s(t) = A(t) \cos(\omega_0 t + \theta_0) \quad (1-8)$$

一个正常的调幅波，其包络 $A(t)$ 必须始终保持为正值。根据式 (1-7) 可知，只有在 $m \leq 1$ 的情况下这个条件才能满足。亦即调幅系数 m 必须不大于 1，才能得到正常的调幅波。

如果调幅系数 m 大于 1，由于三角函数 $\cos \Omega t$ 可正可负，因此调幅波的包络 $A(t)$ 就有可能落在负值区，这种情况称为“过调幅”。在发生过调幅的情况下，调幅波用包络检波器来接收将会产生严重的非线性失真，亦即在检波器的输出端除了单音信号本身的频率 F 外，又带来了许多谐波分量 $2F$ 、 $3F$ 、…这是不容许的。

根据上述要求，我们可以说明常数 A_0 在调幅波表达式中的作用。因为 $m \leq 1$ ，则由式 (1-5) 可知 $A_m \leq A_0$ ，亦即调制信号的幅度 A_m 必须不大于载波幅度 A_0 。如果 A_m 增

加, 则为了保证不产生过调幅现象, A_0 也必须增加。这种情况与决定放大器的静态工作点位置是相同的。当输入信号幅度增加时, 为了防止放大器过载 (产生非线性失真), 工作点位置必须向静态电流大的方向移动, 相应的直流偏置电压也必须加大。因此, 调幅波中的 A_0 值就相当于线性放大器中的直流偏置电压。不过它在式 (1—7) 内表现为直流分量, 而在式 (1—6) 内则表示为未调制情况下的载波幅度。

总之, 为了保证不产生过调幅, 未调制时的载波幅度 A_0 必须不小于调制信号的幅度 A_m , 亦即调幅系数 m (代表它们的比值) 不大于 1。

我们在图 1—1 上画出单音信号调制时的调幅波, 其中 (a) 是调幅系数 $m=0.5$ 时的正常波形, 而 (b) 是 $m=1.5$ 时的过调幅波形。

在画调幅波时, 应该先将调制信号 $A_m \cos \Omega t$ 和直流分量 A_0 相加, 然后与单位幅度的载波 $\cos \omega_0 t$ (这里假定载波的初相 $\theta_0=0$) 相乘。由于 $\omega_0 \gg \Omega$, 故相乘后的调幅波就是在包络 $A(t)$ 覆盖下的高频振荡。在一个高频振荡周期内其包络值 (属于慢变化) 基本上是不变的, 因此高频振荡 (属于快变化) 的幅度将随着包络的规律变化。这样, 就形成了以慢变化包络为幅度, 又以快变化载波为振荡周期的高频调幅波, 并且相对于时间轴呈对称的波形。

在过调幅的情况下, 由于 $A(t)$ 中有一部分落入负值区, 当它与 $\cos \omega_0 t$ 相乘时会产生反相现象, 即原来的正半周变成了负半周, 而原来的负半周却成了正半周。特别是在调幅波包络的过零点处会产生许多反相点, 它们就是引起非线性失真的原因。

在实际应用中, 为了防止产生过调幅, 通常选用调幅系

数 $m=0.3$ 为典型值，最大值取 $m=0.8$ 。当 $m=1$ 时可称为“满调幅”，它仅在个别场合下使用。

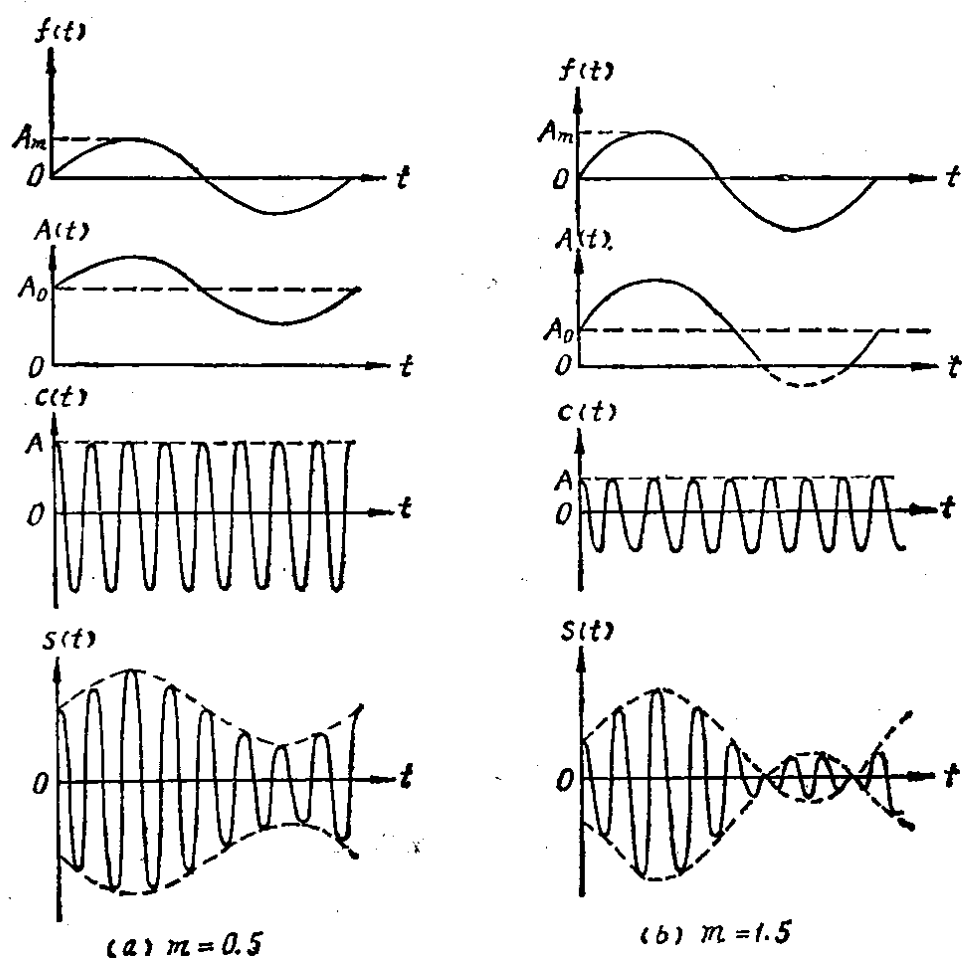


图 1—1 单音调制的调幅波

以上分析了单音信号调制的情况，它比较简单明了，在测试技术指标时常用它作为参考。但实际上，调制信号总是比较复杂的波形，用它来调制所产生的调幅波也比较复杂，不容易在波形上看得清楚。因此对于多音信号（复杂信号通过频谱分解后可称为“多音信号”）的调幅波通常是采用另外一种方法来分析，它称为“频谱分析法”，我们将在下一节内介绍。但是尽管调制信号复杂，其调制方法和产生调幅波的过程与单音调制是一样的，因此这里不再重复。

到这里为止，我们已经回答了什么是幅度调制的问题。

它就是利用调制信号（亦即要传输的信息）来改变载波的幅度参数，将它的有用信息依附在载波的幅度变化上进行传输，以达到交换信息的目的。调幅波的特点是以慢变化包络为幅度，并以快变化载波为周期的高频振荡。它的包络变化决定于调制信号波形，而其高频频率仅与载波有关。这里最重要的问题是要防止产生过调幅现象，即调幅系数不得大于1。

第三节 幅度调制的特点是什么

前面我们已经知道了调幅波在时间波形上的一些特点，本节将从频谱分析的角度进一步来揭示幅度调制的特点。

首先仍从单音调制开始，通过三角公式变换，可将式（1—6）写成

$$s(t) = A_0 \cos \omega_0 t + \frac{mA_0}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t + \frac{mA_0}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t \quad (1-9)$$

这里已经假定载波的初相 θ_0 为零。

式（1—9）告诉我们，单音调制时的调幅波是由三个频率分量所组成，其中一个是幅度为 A_0 的载波，角频率仍为 ω_0 ；第二个是幅度为 $\frac{mA_0}{2} = \frac{A_m}{2}$ 的上边频，其角频率为 $\omega_0 + \Omega$ ；第三个是幅度为 $\frac{A_m}{2}$ 的下边频，其角频率为 $\omega_0 - \Omega$ 。上边频也可称为“和频”，因为它是载频与调制频率之和，并且高于载波频率；相应地，下边频又可称为“差频”，因为它是载频与调制频率之差，并且低于载波频率。由于载频通常要比调制频率高得多，即 $\omega_0 \gg \Omega$ ，故上、下边频与载频之差不会很大，或者说上、下边频所占的频带宽度