

73.6
528
2

高等学校教学用书



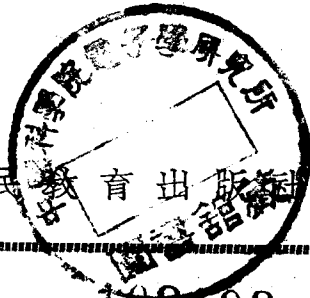
电 子 线 路

DIANZI XIANLU

中 册

清华大学无线电系编

人民教育出版社



102193

电子线路

(中册)

清华大学无线电系编

北京市书刊出版业营业许可证出字第2号

人民教育出版社出版(北京景山东街)

京华印书局印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

统一书号 15010·1092 开本 850×1168¹/₃₂ 印张 8³/₁₆ 插页 4

字数 212,000 印数 0001—6,000 定价(7)¥ 1.10

1961年12月第1版 1961年12月北京第1次印刷

中册目录

第八章 无线电技术概述	1
§ 8-1 无线电电子学的发展简史	1
§ 8-2 无线电通讯的一般系统和它的组成部分	2
§ 8-3 无线电波的辐射和传播	4
§ 8-4 无线电波波段的划分	7
§ 8-5 无线电讯号的控制和它们的频谱	9
第九章 振荡回路	19
§ 9-1 振荡回路中的自由振荡	19
§ 9-2 串联振荡回路	21
§ 9-3 并联振荡回路	32
§ 9-4 耦合振荡回路	43
§ 9-5 复杂振荡作用于振荡回路	65
第十章 谐振放大器	77
§ 10-1 谐振功率放大器(他激振荡器)	77
§ 10-2 倍频器	132
§ 10-3 调谐放大器	134
§ 10-4 频带放大器	142
第十一章 自激振荡器	149
§ 11-1 电子管自激振荡器的工作原理	149
§ 11-2 自激振荡器振荡的持续条件	151
§ 11-3 电子管自激振荡器的平衡条件	151
§ 11-4 电子管自激振荡器的稳定条件	153
§ 11-5 反馈线和振荡特性曲线	156
§ 11-6 栅路自给偏压	161
§ 11-7 间歇振荡	163
§ 11-8 拖曳效应	164
§ 11-9 自激振荡器的线路	166
§ 11-10 自激振荡器的稳频	168
§ 11-11 自激振荡器的晶体稳频	170
第十二章 调制、检波、变频	173
§ 12-1 非线性电路中频谱的变换	173
§ 12-2 调制	175
§ 12-3 检波	185

§ 12-4 变频	201
第十三章 无线电通讯设备概述	215
§ 13-1 无线电发送设备概述	215
§ 13-2 无线电接收设备概述	222
§ 13-3 无线电接收机的输入电路	238
§ 13-4 无线电接收机中的自动增益控制	251
§ 13-5 无线电接收机的调谐指示	255
第十四章 高频应用仪器设备	258
§ 14-1 频率计(波长计)	258
§ 14-2 元件高频参量测量仪器	261
§ 14-3 讯号发生器	265
§ 14-4 电子管伏特计	267
§ 14-5 高频炉	269
附录 III. 分贝和功率、电压、电流比值换算表	274
附录 IV. 光顶脉冲分解系数表	275

第八章 无綫电技术概述

在前面数章中闡述和分析了有关低頻問題的一些电路。下面几章将要討論有关高頻电路的問題。

从发展过程来看,无綫电电子学首先是应用于无綫电通訊,其次是无綫电技术的其他方面(如导航,定位等),在第二次世界大战后才逐渐广泛的应用于其他科学技术以及国民經济領域(如高頻加热,高頻淬火,遙測,遙控等等)。无綫电技术領域不但是高頻电子綫路最早的应用場所,今天也仍然是它最主要的应用部門之一。对于电真空技术专业的工作人員來說,除应掌握高頻基本电路外,也还需要知道无綫电技术的基础概念。这样一方面可以了解基本电路在无綫电技术范畴中的地位和应用的情况,另一方面也可以了解在不同情况下电子綫路对器件提出不同要求的原因。

因此在討論具体电路前,先概括的介紹一些有关无綫电技术的知識以及高頻电子綫路其他应用范围的知識是有益的。

§ 8-1. 无綫电电子学的发展簡史

自 1895 年 5 月 7 日俄国偉大学者 A. C. 波波夫公开表演他发明的世界第一架无綫电接收机(当时他把它称作“雷电指示器”)起,无綫电事业就开始迅速发展起来。几年以后于 1901 年就已經能跨越大西洋通訊了。到 1904 年制成了二极管,1906 年制成了三极管,基于电子管的整流和放大作用,很快就被用于无綫电設備中,从而形成了一門新的技术科学——无綫电电子学。电子器件和无綫电的結合,它們相互促进,既使无綫电通訊有了划时代的长足发展,又使电子器件不断改善特性、增加品种。同时也給其他各

个科学领域和国民经济部门有应用这门新科学的可能性。

基于电子管的放大作用，1913年制成了电子管振荡器，其后更制成了电子管放大器，使通讯距离迅速增长，并使通讯的可靠性大为增加。更基于电子管的检波作用，于二十世纪二十年代实现了无线电电话通讯。在这个基础上其后又实现了无线电广播，无线电电视等等的无线电通讯方式。

基于无线电线路多种多样的要求，又促使电子器件迅速发展，除二极管、三极管外又制成了多极管，大功率管，微形管，电子束管，电测管，控制管等型式繁多的电子器件。

由于电子线路一系列的优点：迅速、准确、灵敏、便于遥测、遥控等等，它除了仍然作为通讯的主要工具外，于第二次世界大战后更普遍的被应用到各个科学领域和企业部门了。例如：物理，化学，天文，气象，医学，采矿，冶金，导航，农业以及原子能和宇宙航行等各个方面。

§ 8-2. 无线电通讯的一般系统和它的组成部分

“无线电通讯”这个名词应该了解为：不用导线把讯号传到远方去“或是”为了传递信号不用导线来传输电能的过程由于这种传输能量的效率非常低($\ll 1\%$)所以到现在为止，无线电传输还只是用来传输信号，如果能把传输电能的效率提高，用无线电传输能量就可以解决移动物(车、船等)尤其是飞行物(如飞机火箭等)携带过重燃料的问题，所以这也是值得注意的。

无线电通讯最少要有两个组成部分，这就是：1)无线电发送设备——产生高频率的电振荡，然后把它向空间辐射出去。2)无线电接收设备——接收这个高频率振荡，有时也把传播这个高频率振荡的传播介质列为第三个组成部分，这可以用图 8-1 的方块图示意如后。

无线电通讯的方式可以分为：1) 电报；2) 电话；3) 传真；4) 广播；5) 电视。其中前三种为商用通讯，一般多是“一个对一个”的通讯；后两种是广播通讯，一般是，“一个对许多个”的通讯。在通讯时我们可以选择其中的一种或数种同时应用。

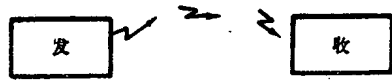


图 8-1. 无线电通讯的组成部分。

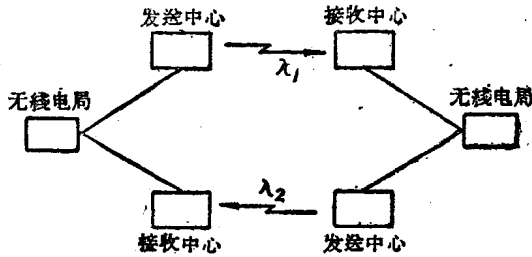


图 8-2. 双工制通讯系统。

在商用通讯中，一般都是采用“双工制”的。这就是通讯的双方都是既可收又可发的，它的通讯系统可以用图 8-2 的方块图示意如上。

广播通讯一般是单向通讯的；就是发的只发，收的只收，讯号不能反向传送。无线电广播听众是无法用无线电通知广播电台他们的要求的，这种通讯系统可以示意如图 8-3。

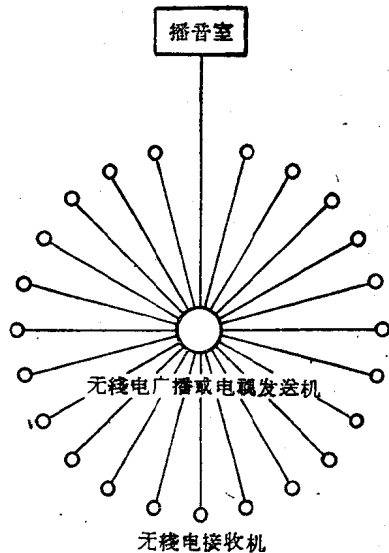


图 8-3. 广播(单向)通讯系统。

§ 8-3. 无綫电波的輻射和传播

当导綫上有交变电流流过时，导綫周圍就有变化的电場和磁場发生，同时也就有电磁能的輻射（发射）。由交变电流从导綫上具体的輻射还須要注意：1) 导綫本身的长度要和波长能相比拟的时候才可能有較大量的輻射能；2) 交变电流的頻率太低（也就是說波长太长）时，实际的輻射也是几乎等于零的。这就是无綫电通訊中为什么要有天綫以及必須另有高频发生器，而不直接使用普通工业用电发射的原因。

下面再来談談从天綫輻射出来的能量（电磁波）如何傳到接收地点，也就是无綫电波傳播。

在馬克士威提出“光”是电磁波以后，当时就都认为所有的电磁波都必将和“光”一样是以直綫行进的，当然属于电磁波的王綫电波也不例外。波波夫第一次的王綫电通訊是在很短的距离間（可視範圍內）进行的，这与无綫电波直綫行进的論点沒有矛盾，可是不久以后，无綫电通訊距离已經远远超过了“可視範圍”，并且以后所有无綫电通訊的发展都毫无疑义的說明它不能再用“光学直射定理”来解釋。后来有了“繞射”的理論，因为波长愈长繞射現象愈显著，于是当时的无綫电通訊就都轉向了“长波”（ $\lambda = 2000 - 3000$ 米），虽然长波的设备是既庞大又昂貴的。当时认为短波是沒有多少实际用途的，于是就把它让給“无綫电爱好者”去使用了。在 1920 年前后，爱好者們发现用发射功率只有几瓦的短波机（ $\lambda < 100$ 米）竟能和地球上任何点建立联系（包括地球的对面点处），而当时使用长波横过大西洋的通訊却需要若干千瓦，这个現象与繞射理論是矛盾的。这不能不使学者們引起注意。以后的研究使早在 1902 年就已提出而未受注意的电离层理論得到了公认，而可以用“反射”來說明短波的傳播。

电离层理论指出：地球外圍稀薄的空气被宇宙射线所游离，我們叫它做电离层。現在已可量測出地球外圍大約在 100~150 公里处有一层比較稳定的电离层，叫它为 E 层，而再外边，距地面 200~250 公里和 250~500 公里处还有一层不太稳定的电离层，叫做 F 层。F 层有时候为一层，有时又分为两层，而叫做 F₁ 层和 F₂ 层，如图 8-4 所示。电离层的高度和厚度是和宇宙間射线的强度有直接关系的，所以它們都在随着太阳的出沒、照射角度以及宇宙間星球位置而变化的，这說明电离层随着日夜，季节以及年份的不同而变化的現象。

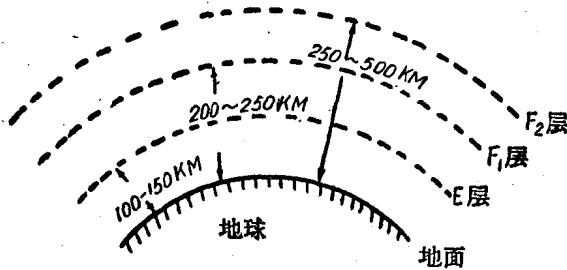


图 8-4.

电离层的存在对于电磁波除有吸收作用外，还有反射作用。对于长波无线电波，几乎全部被它吸收而不能返回地表面。对于短波无线电波則波长愈长的吸收愈多，波长愈短的反射愈多，波长再短穿透力也随之增加結果反射波又随之减少。

为了区别由电离层反射的电波和直接沿地面传播的电波，我們分別把它們称为空間波(天波)和地面波(地波)。由于电磁波繞射能力是随波长的增加而增加的，所以长波主要依地面波传播，短波由地面波传播的区域較小，但另外还有空間波的传播区域，而超短波則大都依靠直綫传播的(地面上的空气非均匀质，而可能有散射現象存在，实际传播距离常比直綫传播距离大許多)。

既然地表面的情况变化不大，而电离层的情况变化快而大，所

以地面波稳定,可靠,而借空间波传播信号,常因昼夜不同,季节不同等原因而使通讯的可靠性降低,并且也不稳定有“衰落现象”(这些缺点已经都可以避免)。

长波和短波的通讯区域可由图 8-5, a 和 b 看出, 在长波的情况, 无论任何角度的空间波均被吸收, 全不返回地面(或甚微弱), 而地面波的传播却可以相当的远。在短波时, 辐射角大的空间波(如 A)透过电离层射于宇宙, 辐射角太小的空间波(如 D)大部分

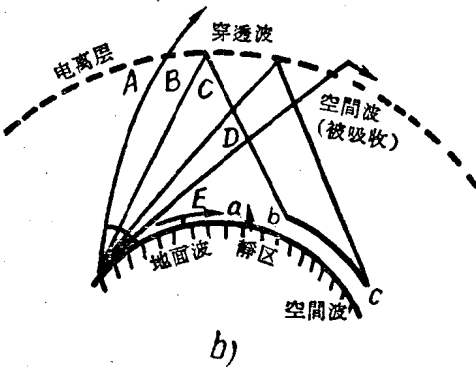
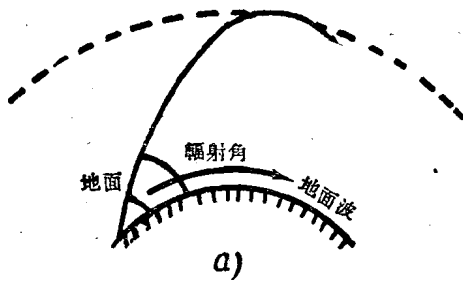


图 8-5.

a—长波传播的情况; b—短波传播的情况。

被吸收, 即或有反射也常不能达于地面(角度关系, 反射波将不触及地面又达电离层)。辐射角适当的空间波(如 B、C)经电离层反射后达于地面, 如 b—c 区域。而地面波此时的传播距离比长波时要小, 如 o—a 区域。图中 a—b 区域可能收不到无线电波(地面波或空间波), 这是短波传播的特殊现象, 叫它作越域传播, 而常把 a—b 域称为“静区”。

由于电离层的变化, b—c 区域常有颇大的变化, 两个固定点间的通讯如果是用短波, 就常须要选择各种不同波长的无线电波, 以适应电离层的反射情况, 这就是在短波通讯时, 常换波长的原因。此外,

由于到达接收站的电波可能是經過两个不同傳播途径（地面波和空間波或一次反射空間波和二次反射空間波）而来的，当电离层变动时，常使两个波間的相角随時間改变，发生干扰，有时使訊号增强有时减弱訊号，这就使接收的电波强度起伏不定，这种現象叫做“衰落現象”。可以用分集式接收系統和自动增益控制綫路来消除它。

§ 8-4. 無線電波波段的划分

無線電波的傳播既然有如上的情况，为了更好的利用它們，常把不同波长的电波作如下的分工：

- 1) 长波，用于标准报时，大区域广播等。
- 2) 短波，用于广播，远距离通訊，傳真，以及海上和航空通訊。
- 3) 超短波，用于定位，电视等。

此外为了以后研究和使用方便起見，更把它們划分成許多假想的区段——波段，这就是無線電波波段的划分。

在無線電系統里，現在我們使用的交变电流的頻率，大約是 $10^4 > f > 3 \times 10^{10}$ 赫，即 $30,000 > \lambda > 1$ 厘米，它們大致介于高的声頻和赤內綫之間的波段。可以看出这是非常广的一个范围。由于它們的产生、放大，接收以及更重要的傳播方式等的不同，我們把它們分段如下：

表 8-1

名 称	波 长 (米)	頻 率	傳 播 方 式
长 波	大于 3,000	小于 100 千赫	地 面 波 地 面 波 空 間 波 空 間 波
中 波	3000~200	100~1,500 千赫	
中 短 波	200~50	1,500~6,000 千赫	
短 波	50~10	6~30 兆赫	
超短波	米 波	30~500 兆赫	直 射 波
	分米波	300~3000 兆赫	
	厘米波	3000 兆赫以上	

这种波段的分法完全是人为的，实际在波段之間并没有任何显著的划分界限。我們在其他文献中可能遇到另外的一些分法，例如美国通訊联邦委员会在 1942 年曾建議把頻率按十进法划分如下：

表 8-2

名 称	符 号	波 长 (米)	頻 率
甚 低 頻	<i>V. L. F</i>	30,000~10,000	10~30 千赫
低 頻	<i>L. F</i>	10,000~1,000	30~300 千赫
中 頻	<i>M. F</i>	1,000~100	300~3,000 千赫
高 頻	<i>H. F</i>	100~10	3~30 兆赫
甚 高 頻	<i>V. H. F</i>	10~1	30~300 兆赫
超 高 頻	<i>U. H. F</i>	1~0.1	300~3,000 兆赫
过 高 頻	<i>S. H. F</i>	0.1~0.01	3,000~30,000 兆赫

天綫的輻射一般都是四面八方的傳播，在他周圍將有很大的一个地带都可以收到它的輻射电波，为了能在一个地区設立一些发射天綫(即几个电台)而不至于彼此干扰，我們就希望也象有綫电似的，能各有各的接收台，既不至于互相弄錯，也不至于互相干扰，为此可以用下列的方法：

1) 時間的划分——同时在一个地区只能有一个电台工作，这样的划分方法不实用，因为一天适于播音的时间有限，如果再这样一分，每个电台就只能工作很短的时间了。

2) 空間的划分——虽然可以用空間发送，但是如果分开得很細，現在在技术上还有困难，并且也不适于广播。

3) 頻率的划分——各个发送电台有它固定的可是彼此不相同的頻率，接收时使用对各种頻率有不同感受能力的綫路(一般都是使用有选择性的振蕩回路)就可以很好的把各个发送台分开，这种划分的方法現在被广泛的应用着。

电台之間頻率的間隔，一般是由發送訊号的不同和接收机的分隔能力而定，現在使用的情況是：1)一般通訊只需几百赫~3千赫；2)廣播語言和音樂需要10~15千赫；3)頻調廣播約需150千赫；4)電視廣播約需6兆赫。這些波道的划分主要是根據發送各種訊号時所有的頻帶寬度。

§ 8-5. 無線電訊号的控制和它們的頻譜

無線電訊号一般都是受低頻信号控制的高頻振蕩。控制的过程称作調制。可以用数学式把高頻振蕩电压瞬时值表示为：

$$u = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (8-1)$$

式中 U_m ， ω 和 φ 分別称为 u 的幅度，角頻率和相角。如果使 U_m 随信号 $S(t)$ 改变則称为幅度調制，简称幅調。如果使 ω 或 φ 随信号 $S(t)$ 改变則称为頻率調制或相位調制，简称頻調或相調。另外还有脉冲調制以后再說。

因为 $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ 所以 ω 或 φ 的改变必致彼此关連而不能单独存在，有时把頻調和相調总称为幅角調制简称角調。下面就来分別把幅調和角調訊号分析一下。

一、幅調波的頻譜

当調制信号为簡單的余弦振蕩时，可以把幅調振蕩写成：

$$u = U_c [1 + M \cos(\Omega t + \Phi)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (8-2)$$

式中除高頻振蕩电压的参量 U_c 外，还有低頻信号的角頻率 Ω 和相角 Φ ，其中 M 称为幅調系数，它表明高頻电压幅度被控制的多少。此时振蕩波形如图 8-6 所示。

图中：实曲綫为高頻振蕩电压瞬时值 u ，虚曲綫称为 u 的包迹，它是所有 u 的巔值点的軌迹，它的形状恰好是控制波的波形。图中也画出了高頻振蕩最大和最小的幅度 $U_c(1+M)$ 和 $U_c(1-$

$-M)$ 。

比值

$$M = \frac{U_c(1+M) - U_c}{U_c} = \frac{U_c - U_c(1-M)}{U_c} = \frac{U_c(1+M) - U_c(1-M)}{U_c(1+M) + U_c(1-M)}, \quad (8-3)$$

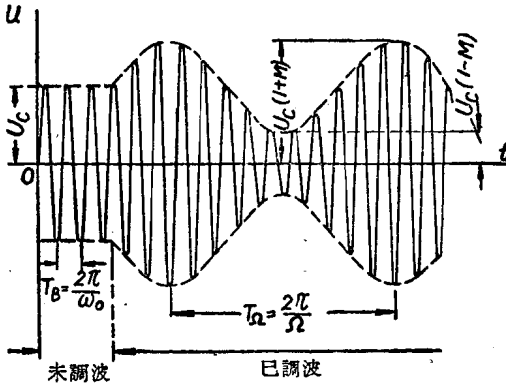


图 8-6. 幅調振荡波形。

即为幅調系数。如果信号本身是一个复杂的波形，也可以把它分解为若干个余弦波的和。这样被調制的高頻振荡电压的数学式将为：

$$u = U_c \left[1 + \sum_{k=1}^n M_k \cos(\Omega_k + \Phi_k) \right] \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (8-4)$$

式中 k 表示信号分析出的余弦波序，此时 M_k 为 k 序波的部分幅調系数。此种幅調振荡波形如图 8-7 所示。

为了使研究简单化，常把复杂振荡分解成許多具有不变幅度的简单正弦振荡之和。这就是复杂振荡的頻譜分析。

复杂振荡通过电路后，它的电压，电流，相角等数值都可能有所改变。直接用复数法計算这些数值的变化是相当繁难的。为了使研究简单化，常先把复杂振荡分解成許多具有不变幅度，频率和相角的純正弦振荡之和。这就是我們将要作的复杂振荡的頻譜分

析。作过频谱分析以后，如果需要研究原振荡通过电路后各参量变化的情况，就可以先分别计算各个分解后的纯正弦波的参量通过电路后的数值，再用叠加法求得所需的结果。

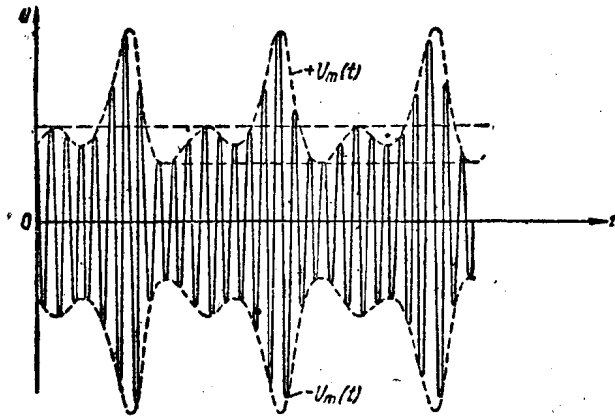


图 8-7. 幅调振荡 $u = U_m(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$.
 $U_m(t)$ 与 $-U_m(t)$ 为包迹曲线。

对于如(8-2)式的最简单的幅调振荡，可以利用

$$\cos A \cos B = \frac{1}{2} \cos(A+B) + \frac{1}{2} \cos(A-B)$$

的关系分解为：

$$\begin{aligned} u &= U_c [1 + M \cos(\Omega t + \Phi)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = \\ &= U_c \left\{ \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{M}{2} \cos[(\omega_0 + \Omega)t + (\varphi_0 + \Phi)] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{M}{2} \cos[(\omega_0 - \Omega)t + (\varphi_0 - \Phi)] \right\}. \end{aligned} \quad (8-5)$$

可见一个最简单的幅调振荡可以用三个正弦振荡和来表示。由于 $\omega_0 + \Omega$ 和 $\omega_0 - \Omega$ 高于和低于 ω_0 ，所以常把后两个振荡分别称为高傍频($\omega_0 + \Omega$)和低傍频($\omega_0 - \Omega$)。而把只是携载信号的高频振荡 ω_0 称为载频。

同样可以把如(8-4)式的更复杂的幅调振荡,分解为:

$$\begin{aligned}
 u &= U_c \left[1 + \sum_{k=1}^n M_k \cos(\Omega_k t + \Phi_k) \right] \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = \\
 &= U_c \left\{ \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \sum_{k=1}^n \frac{M_k}{2} \cos[(\omega_0 + \Omega_k)t + (\varphi_0 + \Phi_k)] + \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{k=1}^n \frac{M_k}{2} \cos[(\omega_0 - \Omega_k)t + (\varphi_0 - \Phi_k)] \right\}. \quad (8-6)
 \end{aligned}$$

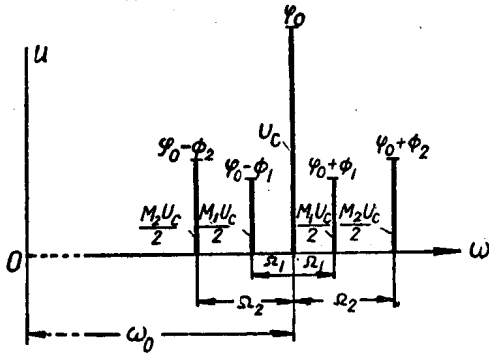


图 8-8. 幅调振荡的频谱图 ($\Omega_2 > \Omega_1$)。

图中一个线段,代表一个纯正弦振荡,它们的长度表示各个振荡幅度的相对大小,它们在水平方向的间距表示彼此间的频率差,而它们的相角则分别注明于各各线段上。

由图 8-8 可以看出傍频振荡的线段是成对的对称的分布于载频振荡线段的两侧。此外也可以看到一个复杂振荡在频率坐标上将占有相当宽度的,我们把距载频最远的两个傍频间的距离称为频带宽度。

分解后的幅调波除可用如图 8-8 的频谱图表示外,也常用如图 8-9 的矢量图表示如下:

分解后的复杂振荡,常可用 $U-\omega$ 坐标系统表示如图 8-8。这种表示法常称为频谱图。

图中一个线段,代表一个纯正弦振荡,它们的长度表示各个振荡幅度的相对大小,它们在水平方向

图中是令坐标系在顺时针方向以 ω_0 的角速度旋转, 并且把代表两个旁频的示量 $\frac{M}{2}U_c$ 移到载频矢量 U_c 的顶端后的情况。此时两个旁频各以角频率 Ω 反向旋转, 而它们的合量则永远落在矢量 U_c 或其引长线上。由图 8-9 也可以看出幅调振荡只是振荡的幅度随时间改变而它的相角 φ_0 , 角频率 ω_0 是固定不变的。如果选择相角 φ_0 使 U_c 垂直于横轴, 则可以在时间轴上画出各各时刻幅调振荡各分量情形。如图 8-10 所示。

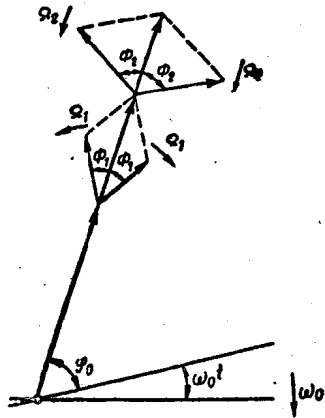


图 8-9. 幅调振荡的矢量图。

图中虚线是把各时刻最后合量的顶点联接而成的曲线, 它表示幅调振荡幅度随时间变化的情况。它的变化频率就是调制频率 $\frac{\Omega}{2\pi}$ 。

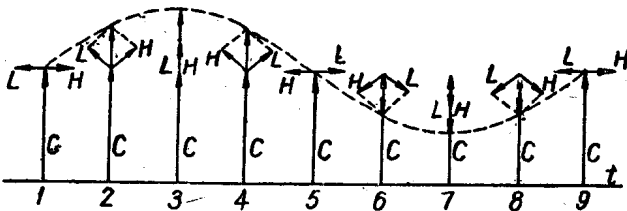


图 8-10. 间隔 $\frac{T_\Omega}{8}$, 各时刻的幅调波矢量图。其中 C 表载频, L 表低傍频, H 表高傍频。

二、角调波的频谱

当调制信号为简单的正弦波时, 可以把角调波写成:

$$u = U_m \cos [\omega_0 t + \varphi_0 + m \sin (\Omega t + \Phi)]. \quad (8-7)$$