

无綫电工程理論基础

上 冊

吳 守 一 編

中国人民解放军軍事工程学院

一九五八年四月

无綫电工程理論基础

上 册

吳 守 一 編

*

中国人民解放军軍事工程学院出版

軍事工程学院印刷廠印刷

118 • 1192

*

开本: 787×1092 1/25, 11¹³/₂₅印張, 232,232字

1958年4月第一版, 印数 1—1412冊

成本費: 1.42元

序 言

本書是根据我院教学大綱的要求而編写的，拟分三册付印。上册包括緒論、訊号分析、各种振盪回路及其構成元件等內容。在緒論中，首先对无綫电傳送訊号的全部过程作了簡單敘述，使初学者开始学习时就可以获得无綫电工程的整个概念。以后的一章接着分析无綫电工程上所傳送各种类型訊号的頻譜和頻帶，这样可以增强学习以后各章的目的性。

中册包括四端網絡、濾波器、傳輸綫及訊号通过直綫性电路等內容。因为濾波器和傳輸綫都是四端網絡，应用到四端網絡的理論，所以安排在四端網絡之后。同时，訊号通过直綫性电路实际上就是分析訊号通过直綫性四端網絡，因此中册內容是屬於一个系統。

上册和中册都是敘述直綫性电路問題，下册則是分析研究非直綫性电路，內容包括非直綫性电路的分析方法和应用，最后敘述各种自激振盪的理論。为了与專業課程分工，下册內容主要着重分析研究非直綫性問題的一般方法，应用方面如調制、檢波、倍頻、分頻等，只从頻譜变换的觀點作为例子說明，不分析具体綫路。自激振盪則着重应用各种理論来分析研究自激振盪产生的条件和建立过程，所研究振盪器的类型，包括反饋式和負阻式，也包括 $R-C$ 型，亦不分析具体綫路。关于弛張振盪器、超高频振盪器以及波导空腔等問題，不在本課程範圍之內。

本書內容，虽曾在教学實踐中应用，并作了若干修改；但由于時間上不及請其他同志校閱，不妥之处，必然很多。尚希讀者随时提出宝貴意見，以便繼續修改。

編者于軍事工程學院

一九五七年十二月

目 錄

第一章 緒 論

§ 1—1	本課程的定義與任務	5
§ 1—2	電磁波的輻射傳播和接收	7
§ 1—3	電磁波的傳播特性和波段的區分	8
§ 1—4	訊號的頻譜和調制	12
§ 1—5	無線電通訊系統構造原理	18
§ 1—6	無線電的發明和發展	20
§ 1—7	無線電事業在中國	27
§ 1—8	無線電技術在國民經濟中政治文化上和國防上的作用	31

第二章 無線電訊號分析

§ 2—1	緒 言	33
§ 2—2	訊號的頻譜	35
§ 2—3	訊號頻譜的分析方法	40
§ 2—4	頻譜函數	43
§ 2—5	某些訊號的頻譜函數	47
§ 2—6	傅立葉積分	54
§ 2—7	訊號的調制	56
§ 2—8	調幅訊號的頻譜分析	57
§ 2—9	脈沖調幅訊號的頻譜分析	64
§ 2—10	調頻和調相訊號的頻譜分析	69

第三章 單振盪回路

§ 3—1	緒 言	81
-------	-----	----

§ 3—2	自由振盪与强迫振盪	82
§ 3—3	串联回路的諧振	85
§ 3—4	諧振曲綫	87
§ 3—5	回路品質因數对諧振曲綫形狀的影响	91
§ 3—6	回路的通頻帶	94
§ 3—7	串联回路元件上的电压和电压傳輸系数	96
§ 3—8	諧振时振盪回路中的能量交換	100
§ 3—9	并联回路的諧振和等效阻抗	102
§ 3—10	簡單并联回路的等效阻抗和諧振曲綫	105
§ 3—11	回路參量对并联时諧振曲綫形狀的影响及与串联时的比較	110
§ 3—12	簡單并联回路的并联等效电路	112
§ 3—13	复杂并联回路的等效阻抗和諧振曲綫	114
§ 3—14	并联回路接于电源时的电压傳輸系数和通頻帶	121
§ 3—15	并联回路的准确諧振頻率	127
§ 3—16	簡單并联回路电压傳輸的諧波抑制	132
§ 3—17	复杂并联回路的諧波抑制	137
§ 3—18	濾波系数	142

第四章 耦合振盪回路

§ 4—1	緒 言	147
§ 4—2	耦合的种类和耦合系数	148
§ 4—3	耦合回路的等效电路	152
§ 4—4	耦合回路的調諧	158
§ 4—5	全諧振时的傳送功率和效率	169
§ 4—6	初級回路的等效阻抗和耦合頻率	172
§ 4—7	初級回路电流的諧振曲綫	181
§ 4—8	次級回路电流变化的图解研究	184
§ 4—9	次級回路电流的諧振曲綫	191
§ 4—10	耦合回路的通頻帶和根据通頻帶計算回路參量	197

§ 4—11	耦合回路的等效电路·····	205
§ 4—12	耦合回路的滤波系数·····	207
§ 4—13	單調諧耦合回路特性的分析·····	216

第五章 振盪回路元件

§ 5—1	緒 言·····	223
§ 5—2	对振盪回路元件的要求·····	224
§ 5—3	外部条件对元件参量的影响·····	226
§ 5—4	元件阻抗与能量的关系·····	228
§ 5—5	电容器的等效电路和品質因数·····	230
§ 5—6	电容器的类型構造和特性·····	234
§ 5—7	可变电容器的类型和极片形狀的計算·····	240
§ 5—8	綫圈的等效电路和品質因数·····	247
§ 5—9	綫圈的高頻电阻·····	252
§ 5—10	綫圈的类型構造和特性·····	261
§ 5—11	綫圈的分布电容·····	265
§ 5—12	綫圈的电磁場屏蔽·····	270
§ 5—13	綫圈电感量的計算·····	274
§ 5—14	耦合綫圈互感量的計算·····	278
§ 5—15	超高頻振盪回路·····	283

第一章

緒論

§1—1 本課程的定義與任務

“無線電”的外文原義是“輻射”，指不用導線而借電磁波的輻射來傳送電能的过程。這一名称最初仅用于無線電通訊，后来由于無線電技术的发展，特别是电子管应用以后，給無線電技术開闢了許多新的用途。現代無線電工程的範圍，就很广泛了。

無線電工程学的研究对象，主要是产生、放大、变换和傳送高频電磁振盪以及与之有关的其他問題。所謂高频電磁振盪是指頻率很高的交流電流電壓和交變電磁場。

現代無線電工程所研究的問題很多，基本上可作如下分类：

1. 訊号的傳送——電報、電話和广播。
2. 不活动和活动图象的傳送——傳真和电视。
3. 导航——使航行中的飞机、船隻能夠決定自己的航綫和应趨的方向，在航空中更包括盲目着陸和高度測量。
4. 雷達——在远距离外发现目标如飞机、船隻、露出水面的潛艇等，并測定其方位与距离。
5. 远距离操縱——利用無線電来操縱无人駕駛的船隻、飞机、導彈等。
6. 工业上的应用——生产过程的自动化及各种高频热处理方法。
7. 医学上的应用——运用屬於無線電技术的方法，可以制成各种医疗器械，作为透热疗法（高频电疗器）、观测心臟工作（电动心臟形图）及記錄人的腦髓活动（腦髓动片）等之用。

8. 科学研究上的应用——天文学、气象学、原子物理学等的研究，都应用到属于无线电技术的方法。

以上各种应用中，前五种是无线电工程的基本应用，它们的共同点是皆要借电磁波的辐射与传播来完成发送与接收的过程。

无线电工程所研究的问题是如此的广泛，使得我们必须将现代无线电技术划分为许多专业课程，如发射设备、接收设备、天线及馈电设备、电波传播、无线电测量等等。在无线电专业课程的大纲和方针中，提出了研究专门课程之前，应该先研究某些一般性问题的任务，这些一般性问题分为两门课程，即电子管和无线电工程理论基础。后者的内容，就是本课程的任务，所以本课程是一切无线电专业课程的基础。本课程的目的有二：首先，给出无线电工程的一般概念，以便以后研究专业课程中的不同部分时，已具有了无线电工程的整个概念。其次，给出无线电工程设备中广泛应用到的各种主要过程的理论和叙述，着重分析研究方法。

绪论的内容是为了第一个目的，在绪论中，将对无线电工程作一全面的简单介绍，然后说明无线电工程的发展过程和在国内及国民经济部门中的应用。

绪论以后各章则是解决第二个目的中的问题。内容分两部分，一为直线性系统，一为非直线性系统。在直线性系统中，所有电路元件的参量，如电阻、电感和电容，皆可视为不随通过电流或所加电压而变的常数，即分析研究无线电工程中所应用到的直线性电路。这部分内容，包括各种形式的振荡回路和他的构成元件、滤波器、传输线等等。非直线性系统与直线性系统不同之处在于电路中除直线性元件外尚包括非直线性元件，这种元件的参量是随工作条件而变的。无线电工程设备中所应用的非直线性元件，主要是电子管和由半导体制成的晶体管。这部分内容是分析研究包括非直线性元件电路的基本物理过程。无线电工程的主要过程是非直线性的，非直线性元件与直线性电路配合，可以产生、放大、变换和传送高频振荡。

§1--2 电磁波的辐射传播和接收

无线电通讯、导航、雷达、电视及远距离操纵等，皆以利用电磁波传送讯号为基础。电磁波能量系由高频交流电流的能量转换而来，由发射天线完成这一转化任务。因此，无线电发射机的任务，就是产生代表一定讯号的高频电流输入发射天线中，以电磁波形式辐射到空间。电磁波在空间以一定速度向各方向传播，传播路途中遇到接收天线，就会在接收天线中感应同样形式但非常微小的高频电流。接收设备的任务，就是把接收天线中接收到的微小讯号电流放大，并还原成原来的讯号。

现在来叙述电磁波的简单概念。我们知道，电场与磁场是密切联系着的，电场的变化产生磁场，磁场的变化也引起电场。因此，只要有电的或磁的振荡发生，例如天线中高频电流所产生的磁场，就会在周围空间引起连续地互相激发的交变电磁场，这种交变电磁场在场源的周围空间互相激发，并以波的形式和一定的有限速度由近而远地传播，传播速度等于光速，即每秒 3×10^8 公尺。这种互相激发的交变电磁场的传播过程称为电磁波或无线电波，简称电波。

电磁振荡变化一周期时，电波所传播的距离，称为波长，常以 λ 表之。由于频率 f 代表每秒的周期数，所以乘积 $f\lambda$ 应为每秒电波传播的距离，如以 C 代表传播速度，则得

$$\lambda f = c \quad (1-1)$$

已知频率则可决定波长，已知波长，亦可求出频率。

电波传播速度等于光速，是指在真空中或自由空间传播而言，如果是在其他介质中传播，则电波传播速度应根据下式计算：

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}, \quad (1-2)$$

上式中 μ 及 ϵ 分别为介质的导磁系数和介电常数。如以真空中的

数值代入，則得 $v=c$ 。

辐射电磁波所用天綫的最簡單形式是一根垂直导綫，下端通过高频激励电源接地如图（1—1）（a）所示。激励电动势 e 由发射机供給。

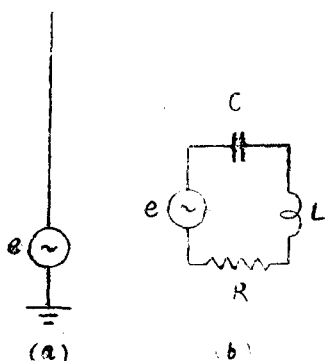


图 1—1

天綫与地間有分布的电容
量，構成回路，同时回路还有电
感量，因此图（1—1）中（a）
的实际天綫电路，可用（b）的等
效电路來說明。当激励电动势加
上以后，天綫中則有高频电流，
引起电磁波的辐射。理論証明，
如果要得到有效的电磁能辐射，
天綫長度必須能与激励电源的波
長相比拟如 $\frac{1}{4}$ 或 $\frac{1}{2}$ 波長等，因

此，波長愈長，天綫设备的構造愈复杂而困难，所以无綫电傳播須应用高频。

垂直导綫也可作为接收天綫，在此情况下，导綫下端通过接收机的輸入电路接地。电磁波傳播时，在空間每一点都产生一定的电场强度和磁场强度，接收天綫位于电磁波的場中时，由于接收点电磁場的作用，就在接收天綫中感应与发射訊号形式相同的电流，輸入接收机中，这样就完成了电磁能辐射、傳播与接收的过程。但所接收到的能量，只是辐射能量中极微小的部分。

§1—3 电磁波的傳播特性和波段的区分

无綫电工程上所使用的頻率范围非常寬，約在 10000 赫至 30000×10^6 赫之間（波長30000公尺至 1 公分）。但接近低限的頻率范围，現在已很少使用，而高限則在扩大着。当頻率很高时，为了表示方便，常採用千赫（ 10^3 赫）或兆赫（ 10^6 赫）作單位。

由于电磁波的传播特性与频率有关，因此我們把它划分为許多波段。將特性相类似的划分为一波段，这特性也决定了該波段的应用。下面就是波段划分表：

頻帶名称	波段名称	頻 率	波 長
高 頻	長 波	100 千赫以下	3000公尺以上
	中 波	100—1500 千赫	3000—200公尺
	中 短 波	1500—6000千赫	200—50公尺
	短 波	6—30兆赫	50—10公尺
超 高 頻	公 尺 波	30—300 兆赫	10—1公尺
	公 寸 波	300—3000 兆赫	1—0.1公尺
	公 分 波	3000—30000 兆赫	10—1 公分
	公 厘 波	30000—300000兆赫	1—0.1公分

以上的划分法是相对的，因为各波段間并没有任何明显的界限，傳播特性一般是随频率的改变而逐渐变化的，也仍有其他的区分波段方法。

电波在均匀空間傳播，与光波一样直綫地傳播着。有兩種傳播方式，一为沿着地球表面傳播的地面波，一为由存在于高空的电离层所折射和反射而折返地面的空間波。

地面波的傳播，由于电波有繞射能力，虽有地球表面曲度的存在，并不限于能見距离，仍能將訊号傳送到地平綫以外很远的地方。当电波沿地面傳播时，电磁場的力綫穿入大地至某一深度，在其中引起渦流損耗和介質損耗，因而一部分电磁能量就会被地所吸收。渦流和介質損耗都随着频率的增高而增大，频率愈高，則地面波損耗愈大。故在地面波的傳播方式中，長波（頻率

低)較短波为远。同时,波長愈長,繞射作用愈显著,亦使長波宜于利用地面波傳播。由于地面情况不变,故地面波傳播条件亦不变,通訊是稳定的。

空間波的傳播,有賴于高空的电离层。高空大气稀薄,气体分子由于太阳所发出的輻射綫如紫外綫的作用而被游离,在离地面高度不同的地方,形成电子与离子密度不同的电离层。其中电子密度最大的有两个层,即高度約为100—130公里的E层和高度約为200—400公里的F层。所謂层是指电子密度最大处,各层間并没有明显的界限。电离层对电波有折射和反射作用,可以使进入的电波折返地面,形成空間波的傳播方式。(图1—2)为电波傳播两种方式的示意图。由于电离层形成的主要原因为太阳中的輻射綫,因此电离层的高度和强度都与太阳的照度有关,晝夜之間和季节变换时,电离层亦发生变化,一般白天和夏季电离层都較強。空間波的傳播情况,不及地面波稳定,須根据电离层的变化而选用适当的通訊頻率。条件适当时,应用很小的发射功

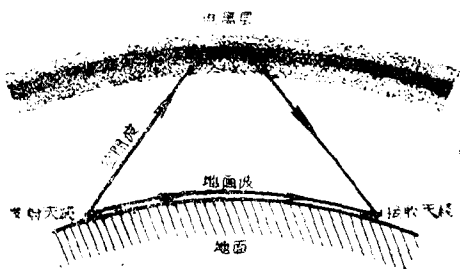


图 1—2

率,可以將訊号傳送至极远的地方。

当电波进入电离层时,电离层中的电子和离子就因电磁場的作用而往复振动。振动的电子和离子与气体分子碰撞,引起能量损耗,使一部分电磁能量被吸收,其中起主要作用的是电子,因为电子質量小,振动幅度大。由于电子慣性关系,頻率愈高,振幅愈小,能量吸收亦愈小,故短波宜于利用空間波。但波長愈短則

使电波折返地面需要較大的电子密度，在超短波範圍內，則电离层不能使电波折返地面了。电离层能否使电波折返地面，不但与频率和电子密度有关，而且还与电波进入电离层的入射角有关，有收不到訊号的所謂“靜区”存在，情况复杂，須在專業課程中研究。

現在就各波段的特性和应用簡述如下：

1. 長波——長波有显著的繞射作用，沿地面傳播时損耗最小，地面波的傳播有着良好的条件。空間波不深入电离层，在电离子密度較小的最低边沿反射，吸收亦不甚大。在离发射机不到1000公里甚至数百公里处，空間波的強度就可以超过地面波的強度，因此进行远距离通訊仍須利用空間波。由于反射長波的 E 层及更低的 D 层，与 F 层比較有相对的稳定性，因之傳播亦相当稳定，不致有突然的变化或使通訊中断。电离层的晝夜变化，对長波傳播稍有影响，但这变化是緩慢的。当 F 层受到騷扰时， E 层以下沒有显著影响。長波的缺点是天綫設備复杂，且須有強大功率才能进行远距离通訊，应用受到很大的限制。長波現在用来給海船和气象台发送准确時間訊号，用来发送气象报告，亦有一部分用作无綫电报通訊。

2. 中波——地面波損耗較長波为大，故白天傳送距离不会远。空間波基本上由 E 层反射，較長波深入电离层，受到強烈吸收，白天难于利用。晚上电离层減弱，傳播距离就有显著的增加。这波段主要供广播之用。无綫电导航，也应用这波段的频率較低部分，因为要利用地面波来保証測向的准确度。也有一部分用作海上或航空通訊。

3. 中短波——地面波損耗更大，空間波則由于通常穿过 E 层由更高的 F 层反射，通过 E 层兩次，吸收亦很大，因此只能供近距离通訊之用。

4. 短波——地面波衰減很快，通常不利用。空間波由 F 层反射，但吸收很小，可作远距离通訊。这一波段的特点是傳播条件

有突出的变化性，稳定性较差。这波段主要用于远距离的通讯和广播，亦用于无线电传真、海上与航空通讯及发送准确时间讯号等。

5. 超短波——空间波不能为电离层反射回地面，不能利用。地面波则一方面由于衰减很快，另一方面由于绕射作用不显著，只限于视线距离以内传播。通常是將天綫架設于高处，以增加直綫傳播距离，更远的距离，可採用中繼站的替續系統。但超短波却有一些重要的优点，例如：频段寬可以分布大量电台，几乎没有天电的干扰，随着波長的变短机器体积也縮小等。特别是天綫尺寸的縮短，可以構成具有高度方向性的天綫系統而不至使構造复杂。引导飞机按仪表着陆的发射机，需要高度方向性的天綫系統，是工作于超短波。电视由于所需傳送頻帶很寬，也用超短波傳播。超短波範圍內的通讯与广播，亦在发展之中。飞机上用以在视线距离內通讯的近距离无线电，都是工作于超短波。超短波範圍內，特别是公分波和公分波，能为位于电波傳播路徑上的物体所反射。此特性与高度方向性的天綫系統相配合，为无线电技术開闢了新的部門，即无线电定位，通常称为雷达，近年来有很大的发展。

§1—4 訊号的頻譜和調制

无线电工程所傳送的訊号形式很多，按照所傳送的訊号性質而異，因为无线电是利用电能來傳送訊号，任何訊号的变化形式必須首先轉換为电的变化形式，方能应用无线电來傳送。当接收机接收到以后，就要設法把电的变化还原成原来的訊号形式，这样就达到傳送訊号的目的。

以无线电話和广播为例，所傳送的訊号是語言和音乐，也就是傳送声音。声音是机械振動在空气中的傳播，因此必須設法將由音波所形成的空气压力变化轉換为电流或电压的变化，应用微音器或話筒就可以达到这目的。图（1—3）是一种最簡單的炭

粒式話筒电路，主要部分为一充滿炭精微粒 C 的小盒和复盖于其上的彈性振动薄片 M 。当傳送声音时，空气的音波振动作用到 M 上，使之按照声音形式振动，这样就会引起盒中炭精粒間压力和电阻的相应改变。于是話筒电路中由電池 B 所供給的电流也发生同样变化，因而在变压器 T 的次級綫圈中感应与原来声音相应的輸出电压 u_c 。

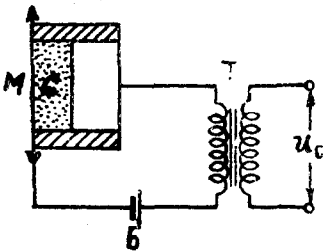


图 1—3

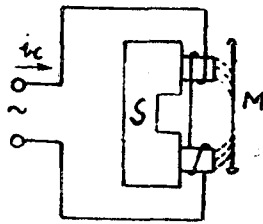


图 1—4

相反的变换是由听筒或揚声器来完成。应用听筒或揚声器，可以将电压或电流的变化还原为空气中的音波振动。图（1—4）为听筒构造的簡化图，听筒盒内部为一永久磁铁 S ，兩极向上突出，与复盖于盒上的磁性振动薄片 M 相接近，使永久磁铁能对振动薄片施加一固定的引力。永久磁铁兩极的突出部分为軟鉄心，其上繞有綫圈，綫圈中通过代表声音变化的电流 i_c 。电流变化引起磁铁引力的相应变化，使磁性薄片作与声音相应的振动，这样就振动空气而发出原来的声音。

音波振动由空气中傳达到人們的听觉器官时，就引起声音的感觉。研究的結果証明：声音这复杂的振动，可認為是許多正弦分量的总和，这些正弦分量各有其頻率、相位与振幅，也就是这些正弦分量决定着声音的性質。因此，无綫电工程上所研究的声音訊号傳送問題，主要就是如何把声音中所包括的一切頻率分量，以电的形式发送出去和接收下来，并且要不变各分量間的相对幅度和相对相位。

为了說明某一訊号中存在一些什么頻率分量，通常应用“頻譜”这一名称。頻譜表示出訊号中所包含的頻率分量，應該根据所傳送訊号的頻譜来設計发射和接收設備。

人类听觉器官所能感觉到的振动頻率范围，各人不完全相同，但可以認為平均是从20赫到16000赫的頻帶中，这頻帶就称为音频或声頻。

实验的結果証明，实际上也不需要傳送这样寬的頻帶。設備能通过的頻帶愈寬，則受到干扰愈大，制造成本亦愈高，而在訊号中除去某些較高或較低的頻率分量，也是对音質影响很小的。例如，人声音的頻率范围，大約是100—9000赫，但傳送清晰的語言，只要300—3000赫的重要部分就夠了。无綫電話中就是傳送这样比較窄的頻帶。对于播送文娱节目的广播，这頻帶就嫌窄了，为了得到滿意的音質，應該傳送40—8000赫的頻帶。

音频屬於低頻，并且其中最高頻率与最低頻率相差是如此之多，以致直接輻射是不可能的。并且不同的語言音乐，頻率范围相同，假定能直接輻射出去，也会互相干扰，无法进行多訊道同时通訊。因此，应用无綫电傳送訊号，必須設法將各种低頻訊号变换成屬於不同頻帶的高頻訊号而后发射出去，这过程称为調制。接收机則可以通过具有选择不同頻帶能力的电路来选出所需要的高頻訊号，而后还原为原来的低頻訊号。这与調制相反的过程称为檢波或反調制。这样就同时解决了电磁能的輻射与多訊道同时通訊的問題。

調制就是用低頻訊号来控制便于輻射的高頻振盪，使它的參量之一如幅度、頻率、相角等，依照低頻訊号而变，这样的高頻振盪就反映一定的訊号了。当依照訊号規律而变的高頻振盪是幅度时，称为調幅，是頻率或相角时，則称为調頻或調相。

现在用音频訊号調幅作为例子來說明。声音本是复杂的振动，包含由許多頻率分量組成的頻帶，但是为了研究的方便，通常是採取一个單音频的正弦波来代替訊号，而后推广到复杂的訊

号。图（1—5）中（a）为代表声音讯号的正弦电压，（b）为未调幅的高频振荡电流，（c）则为调幅以后的高频振荡电流，显然其中已没有低频分量了。设高频振荡的角频率为 ω_0 ，音频讯号的角频率为 Ω ，则分析的结果证明，已调幅的高频电流中包含三个频率分量，即 ω_0 、 $(\omega_0 + \Omega)$ 和 $(\omega_0 - \Omega)$ 。由于一般 $\omega_0 \gg \Omega$ ，所以这三个频率分量是异常接近的，可以用一根天线辐射出去。如果以角频率或频率为横轴，在与各频率分量相当之处作与各该分量幅度成比例的垂直线，则得到表示讯号频谱的频谱图。图（1

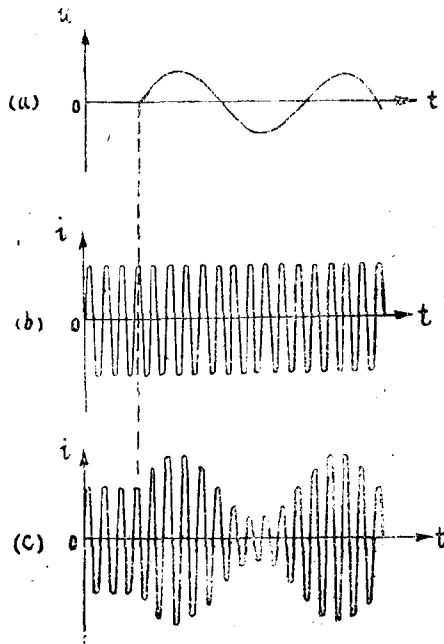


图 1—5

—6）（a）为上述调幅讯号的频谱图。当中分量 ω_0 为未调制前的高频振荡角频率，称为载频，好象由它把音频讯号载送出去。分量 $(\omega_0 + \Omega)$ 和 $(\omega_0 - \Omega)$ 位于载频的两旁，称为旁频或边