

内部资料 注意保存

无线电通信基本原理

资料来源于《HAM's CQ 业余无线电家》

2005 年第 2 期 (总 44 期)、2005 年第 3 期 (总 45 期)、
2005 年第 4 期 (总 46 期)、2006 年第 1 期 (总 47 期)、
2006 年第 2 期 (总 48 期)

【编者按】本教材是北京市无线电管理委员会(现北京市无线电管理局)在 1988 年编印的。全部内容共分八章, 简明扼要、深入浅出地阐述了无线电通信的概念、电磁波基本知识、收发信机的组成, 电波传播以及干扰等无线电基础知识, 曾被北京市无线电管理委员会作为培训北京市各机关、企、事业单位通信管理人员的专用教材。《业余无线电家》将从本期起分三次刊登该教材的部分内容, 供广大无线电爱好者自学、参考。该教材由原武汉通信学院郑兴国编写, 北京市无线电管理委员会审定, 国家体委无线电运动学校(现中国无线电运动协会)校对。

【文档制作说明】本文档根据《HAM's CQ 业余无线电家》2005 年第 2 期(总 44 期)、2005 年第 3 期(总 45 期)、2005 年第 4 期(总 46 期)、2006 年第 1 期(总 47 期)、2006 年第 2 期(总 48 期)所刊登的资料扫描整理制作而成。为了方便阅读, 在原文件的基础上重新编排了页码, 添加了目录。每一页下方椭圆背景中的页码为原刊物页码, 后边的两位为新添加的页码。

本文档**仅供业余无线电爱好者个人学习之用, 请勿用作其他用途**。本资料版权归原版权人所有。

2011 年 3 月 16 日

目 录

第一章 绪论	01
§ 1-1 通信的基本概念	01
§ 1-2 通信的基本模型	03
§ 1-3 通信的工作方式	04
一、单向通信	04
二、单工通信	05
三、半双工通信	05
四、双工通信	05
§ 1-4 模拟通信与数字通信	06
§ 1-5 通信的发展概况	08
第二章 交流电与电磁波	09
§ 2-1 交流电的有关参量	09
一、交流电的瞬时值、最大值与有效值	10
二、交流电的频率、周期和角频率	11
三、交流电的相位	11
§ 2-2 电磁波	11
一、电磁场与电磁波	11
二、电波的极化	13
三、频率和波长的关系	13
四、电磁波谱	14
§ 2-3 无线电波的波段划分	14
第三章 发射机	16
§ 3-1 发送设备与发射机的组成	16
一、无线电发送设备的组成	16
发射机	16
天线及馈线设备	16
电源设备	16
二、话音电流及其频谱	16
三、发送设备的任务	17
四、发射机的基本组成	17
(一) 振荡器	17
(二) 调制器	17
(三) 高频功率放大器	18
(四) 滤波器	18
§ 3-2 振幅调制	18
一、调幅及调幅发射机	18
振荡器	18
缓冲放大器	18
激励放大器	18

输出放大器·····	19
调幅器·····	19
二、调幅度·····	19
三、调幅波的频谱·····	20
四、调幅波的功率·····	21
(一) 载波功率·····	21
(二) 峰值功率·····	21
(三) 电话功率·····	21
五、调幅通信的优缺点·····	22
(一) 由于输出载频及上、下边带, 对发射机滤波器要求 比较简单·····	22
(二) 频谱利用不经济·····	22
(三) 功率利用率低·····	22
(四) 抗干扰性能差·····	22
§ 3-3 单边带调制·····	22
一、单边带信号的产生·····	22
二、单边带发射机的组成·····	23
三、单边带通信的优缺点·····	24
(一) 节约频带·····	24
(二) 节省功率·····	24
(三) 抗干扰性能好·····	24
(四) 受电波传播的影响小·····	24
(五) 便于多路复用·····	24
(六) 对收、发信机的技术要求高·····	24
§ 3-4 频率调制·····	24
一、调频及调频波·····	24
(一) 调频与调频指数·····	24
(二) 调频波的频谱·····	25
(三) 调频波的带宽·····	26
二、调频发射机的组成·····	27
(一) 变容二极管调制器·····	27
(二) 预加重电路·····	28
三、调频通信的优缺点·····	28
(一) 抗干扰性能好·····	28
(二) 发射管的功率利用率高·····	28
(三) 调频波所占用的频带较宽, 只适于在频率范围较宽的 甚高频以上频段工作·····	28
§ 3-5 振幅键控与频率键控·····	29
一、振幅键控 (ASK) ·····	29
二、频率键控 (FSK) ·····	29

(一) 抗干扰性能好·····	29
(二) 便于进行多路通信·····	29
§ 3-6 频率合成器·····	30
§ 3-7 发射机的主要技术特性·····	31
一、载波输出功率·····	31
二、频率稳定度·····	31
三、频率偏差·····	31
四、临道功率·····	32
五、残波辐射功率·····	32
六、发射标识·····	32
七、发射机互调·····	33
八、调制特性·····	33
调制灵敏度·····	33
调制频率特性·····	33
调制线性·····	33
第四章 接收机·····	34
§ 4-1 接收设备与接收机的组成·····	34
一、接收设备的组成及任务·····	34
二、接收机的基本功能·····	34
三、接收机的组成及各级作用·····	35
(一) 输入电路·····	35
(二) 高放·····	35
(三) 一混频·····	35
(四) 一中放·····	35
(五) 二混频·····	35
(六) 二中放·····	35
(七) 限幅·····	35
(八) 鉴频·····	36
(九) 静噪·····	36
(十) 低放及功放·····	36
§ 4-2 接收机的频率搬移·····	36
一、接收机的频率搬移过程·····	36
二、为什么要进行频率搬移·····	36
(一) 有利于提高放大器的稳定增益·····	36
(二) 有利于增强接收机的选择性·····	36
三、如何进行频率搬移·····	37
四、为什么要进行两次频率搬移·····	38
§ 4-3 各类信号的解调方法·····	38
一、对调幅信号的解调·····	38
二、对调频信号的解调·····	39

三、对单边带信号的解调·····	39
四、接收等幅报的方法·····	40
五、接收移频报的方法·····	40
§ 4-4 接收机的附加电路·····	41
一、自动增益控制 (AGC) ·····	41
二、自动频率微调 (AFC) ·····	41
三、自动调谐电路 (ATC) ·····	42
§ 4-5 接收机的主要技术特性·····	43
一、灵敏度·····	43
二、抑噪灵敏度·····	43
三、临道选择性·····	43
四、调制接收带宽·····	43
五、寄生响应抑制制度·····	43
六、互调抑制制度·····	44
七、音频输出功率·····	44
八、谐波失真·····	44
第五章 干扰和噪声·····	45
§ 5-1 干扰和噪声的性质·····	45
一、周期性干扰·····	45
二、脉冲干扰·····	46
三、起伏干扰·····	46
§ 5-2 噪声·····	46
一、接收机内部噪声·····	46
二、外部自然噪声·····	46
三、人为噪声·····	46
§ 5-3 互调干扰·····	47
一、互调干扰及其产生原因·····	47
二、接收机互调·····	49
三、发射机互调·····	49
四、无三阶互调信道组·····	50
§ 5-4 其他电台干扰·····	51
一、同频干扰·····	51
二、临道干扰·····	51
三、镜像干扰·····	52
四、中频干扰·····	52
第六章 电波传播与天线·····	52
§ 6-1 电波的传播方式与特性·····	52
一、电波的传播方式·····	52
(一) 地波·····	52
(二) 天波·····	52

(三) 空间波·····	52
(四) 散射波·····	52
二、电波的传播特性·····	52
(一) 电波的直射·····	53
(二) 电波的反射和折射·····	53
(三) 电波的散射·····	53
(四) 电波的绕射·····	54
(五) 电波的干涉·····	54
(六) 电波的吸收·····	54
§ 6-2 地波传播与地波天线·····	55
一、影响地波损耗的因素·····	55
(一) 大地的导电性能愈好, 电波的传播损耗愈小, 通信 距离愈远·····	55
(二) 工作频率愈低, 传播损耗愈小, 通信距离愈远·····	55
(三) 地波绕过障碍物时, 会产生绕射损失·····	55
(四) 地波损耗和发射天线的形式有关·····	55
二、地波通信的特点·····	55
(一) 信号稳定·····	55
(二) 地波通信主要适用于设备功率大、频率较低的中、 长波固定台工作·····	55
(三) 通过加大发射功率来增加通信距离的效果不明显·····	56
三、地波天线·····	56
(一) 直立鞭状天线·····	56
(二) T 型天线·····	57
(三) 倒 L 天线·····	57
§ 6-3 天波传播与天波天线·····	58
一、电离层及其变化规律·····	58
二、天波的传播特点·····	58
(一) 电离层对电波的反射作用·····	59
1、电波频率愈低, 愈易反射·····	59
2、电子密度愈大, 愈易反射·····	59
(二) 电离层对电波有吸收作用·····	59
三、选用频率的原则·····	59
四、天波通信的特点·····	60
(一) 利用电离层反射, 可以用较小的功率实现远距离 通信·····	60
(二) 要随昼夜、季节更换工作频率, 给工作带来不便·····	60
(三) 由于电离层参数是不稳定的, 造成信号不稳定·····	60
(四) 短波通信有时会出现“静区”·····	60
五、天波天线·····	60

(一) 水平双极天线·····	60
(二) 笼形天线·····	61
(三) 菱形天线·····	61
§ 6-4 直射波传播及其天线·····	61
一、直射波的传播特点·····	61
(一) 在地面上的通信距离通常在视距以内·····	61
(二) 多径传播容易造成衰落现象, 对通信极为不利·····	61
(三) 受地形地物的影响较大·····	62
(四) 不同的折射条件下, 电波射线的弯曲是不一样的·····	62
(五) 超短波和微波受天电干扰小, 较天波通信信号稳定·····	62
二、直射波天线·····	62
(一) 引向天线·····	62
(二) 抛物面天线·····	63
(三) 卡塞格伦天线·····	63
(四) 角形天线·····	63
(五) 鞭状天线及中馈鞭状天线·····	64
(六) 多层折合振子天线·····	65
(七) 螺旋天线·····	65
§ 6-5 天线的主要参数及架设要求·····	65
一、天线的主要参数·····	65
(一) 输入阻抗·····	65
(二) 天线效率·····	65
(三) 天线的方向系数·····	66
(四) 天线的增益·····	66
(五) 天线的频率特性·····	66
二、天线共用器·····	66
(一) 收发天线共用器·····	66
(二) 发信天线共用器·····	67
(三) 接收天线共用器·····	67
三、天线及电台的架设·····	68
(一) 机房与天线位置的选择·····	68
(二) 馈线的选用·····	68
(三) 避雷针的安装·····	69
1、架设避雷针的一般技术要求·····	69
2、避雷接地体的选用和制作·····	69
3、接地体的埋设·····	69

无线电通信基本原理

编者按：本教材是北京市无线电管理委员会（现北京市无线电管理局）在 1988 年编印的。全部内容共分八章，简明扼要、深入浅出地阐述了无线电通信的概念、电磁波基本知识、收发信机的组成，电波传播以及干扰等无线电基础知识，曾被北京市无线电管理委员会作为培训北京市各机关、企、事业单位通信管理人员的专用教材。《业余无线电家》将从本期起分三次刊登该教材的部分内容，供广大无线电爱好者自学、参考。该教材由原武汉通信学院郑兴国编写，北京市无线电管理委员会审定，国家体委无线电运动学校（现中国无线电运动协会）校对。

第一章 绪论

§ 1—1 通信的基本概念

通信是一个很古老的概念，它几乎是伴随着人类社会的出现而发生和发展的。至今在长城上还保留着的烽火台，就是我国古代用以报告边境敌情的通信设施。至于击鼓则进，鸣金则退，则是古代战场上一种重要的指挥通信方式。类似这些简易的通信方式和通信手段，直到近代在某些场合还在使用着。当然，今天人们传递消息、进行通信的主要方式已有很大的变化，从书信、电报、电话到传真、可视电话、数据传输等，真正实现了人们向往已久的“千里眼、顺风耳”的愿望，可以说是有过之而无不及。

概括地说，通信就是由一地向另一地传递消息。人类社会发展到今天，通信方式也随着社会生产力的发展，随着人们对通信要求的不断提高，而在不断地向前发展着。在各种通信方式中，利用电来传递消息的通信方式获得了非常广泛的发展。这是由于电通信方式能使消息几乎在任意的通信距离上实现迅速、准确和可靠的传递。如今，在自然科学领域里，“通信”一词已成了电通信的同义语。

电通信中所传递的消息，有各种不同的形式，如符号、文字、语音、音乐、数据、图片、活动图象等等。因而，根据所传递消息形式的不同，在通信业务上可分为电报、电话、传真、数据传输、可视电话等。如果从广义的角度来看，则广播、电视、雷达、导航、遥控、遥测等也可列入通信的范畴，只是这些多是单向通信而已。

按消息由一地向另一地传递媒质的不同，通信可分为两大类：有线电通信和无线电通信。所谓有线电通信，即消息传递是用导线来完成的通信方式。这里所指的导线包括架空明线、电缆、波导等。图 1—1 是普通有线长途电话系统的示意图，发端电话机将发话人的话音变换为相应的语音电流，载波机则将话音频谱搬移到频率较

高的载频上，使其适于线路传输。而且多个人发话时，可调制在不同的载频上，使其互不干扰。收端则以相反的顺序，载波机将各路信号按频段分开，并将其搬回到话音频谱上，电话机则将此话音电流还原为可闻的话音，使受话人收听，有线电通信通常是收发可同时进行的。

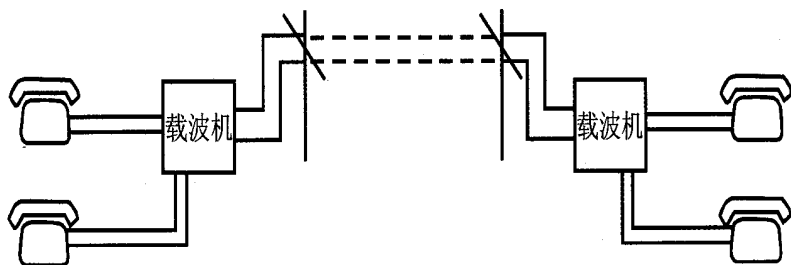


图 1—1 有线长途电话示意图

所谓无线电通信，则不需要架设线路，而是利用在空间传播的电磁波即无线电波来传递消息。图 1—2 是无线电话通信系统的示意图。发方通过话筒将话音变换为相应的语音电流，

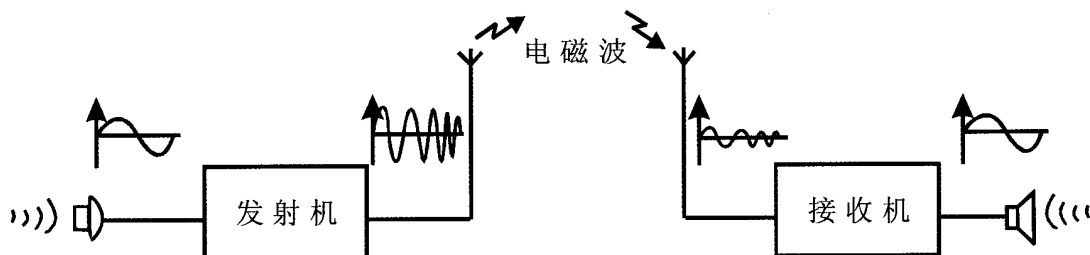
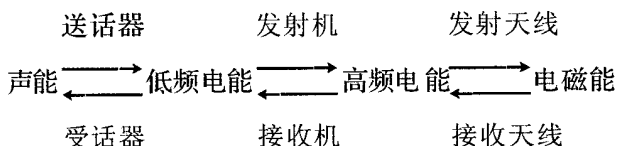


图 1—2 无线电话系统示意图

发射机及发射天线则将话音电流转换成相应的高频已调信号并转换为高频电磁波辐射到空间，并发往另一地。接收端则通过接收天线、接收机及扬声器或耳机完成与发送端相反的变换。

如果只从能量的变换角度来看，无线电话的发送与接收，是通过无线电发送设备与接收设备的有关部份完成下述几次能量变换及其反变换的。即：



通常，有线电通信按传输线路的种类不同，可分为明线通信、电缆通信、波导通信等。无线电通信按使用频段及传播方式不同，可分为长波通信、短波通信，散射通信（电离层散射、对流层散射、流星余迹散射）、超短波通信、微波中继通信、卫星通信等。

近年来,由于激光通信的发展和应用,也有人主张把光通信作为与传统的有线电通信、无线电通信相并列的独立类型。光通信可分为大气激光通信和光纤通信两种,依其传输媒质来看,前者可列入无线电通信,后者可列入有线电通信。只是后者并非用一般的金属导线,而是利用一种玻璃纤维制成的光缆作传输媒质而已。光缆的体积小,重量轻,通信容量大,传输损耗小,不受外界电磁场干扰,在大容量的市话中继通信和长途电话干线通信中,大有取代一般电缆的趋势。

本文主要阐述民用无线电通信的有关基本原理和组织运用问题。

§ 1—2 通信的基本模型

任何一种通信,都是把消息从一地传到另一地。因而,所有的通信系统都可以用图 1—3 加以概括。

发送末端设备的作用,是把各种消息变换成相应的原始电信号(又叫基带信号),为了使这种原始电信号适合在信道中传输,由发射机对原始电信号进行某种变换(调制),变为高频已调信号(又叫频带信号),再送入信道。在接收端,接收机的作用与发射机相反,它从接收到的高频已调信号中恢复出相应的原始电信号(解调),再由接收末端设备将其变换为相应的消息。

图中的噪声源是信道中的噪声与干扰以及分散在通信系统中各处的噪声与干扰的集中表示,它对通信质量有很大的影响,是讨论通信系统时不可忽视的问题。

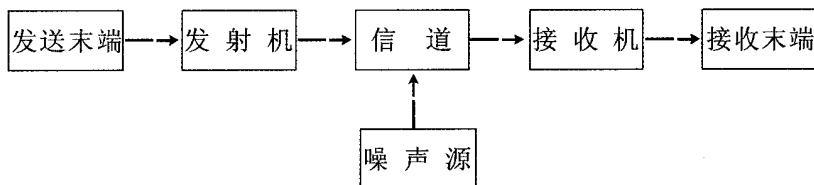


图 1—3 无线电话系统示意图

图 1—3 是对各种通信系统的一个抽象概括,它反映了通信系统的共性,通常称为通信系统的模型图。有必要指出的是,从消息的发送到消息的恢复,通信系统并非仅是完成上述几次变换及其逆变换,系统里通常还有振荡、放大、选频滤波、天线辐射与接收等设施,这些将在有关章节中加以讨论。

这里说明一下,通常把送受话器、电传打字机、传真机等直接由用户掌握使用的设备,称为末端设备;把载波机、载报机、无线电收发信机等直接与信道相连的设备,称为信道机或终端机。当然,这一般是指固定的大、中型通信设备而言,至于小型移动通信设备,则不一定要进行这种区分了。

信道是指与信道机相连的通信线路或无线电路,例如,载波机的信道是架空明线或电缆;短波无线电台的信

道是包括电离层在内的大气层空间；超短波无线电台的信道通常是指视距范围内的空间。

信道是指与信道机相连的通信线路或无线电路，例如，载波机的信道是架空明线或电缆；短波无线电台的信道是包括电离层在内的大气层空间；超短波无线电台的信道通常是指视距范围内的空间。

在无线电通信中，信道又叫做波道或频道，常常作为一个通信系统工作频率的同义语。如某电台拥有可供使用的若干个频率点，就称为该电台能提供若干个信道，单工同频工作时，一个信道就占用一个频率点；如果是单工异频工作或双工，半双工工作，则因收、发频率不同，一个信道就要占用两个频率。

通信是用以传递消息的，在进行有意义的通信时，传递消息就意味着传递了信息。但从

信息论的观点来看，消息中所包含的对受信者有意义的内容才称为信息，有的消息对受信者毫无意义，则不具有信息。例如，天气预报：“明天是晴天”，对多数听众来说，事先不知道明天的天气情况，因而获得了信息。但如果报告：“昨天是晴天”，对于多数听众来说，因为已经知道或无需知道这一情况，就不具有信息。又如，发信者漫无目的地拍发某一字母，而事先又未约定这一动作的含义，受信者也不可能从中获得任何信息。一般地说，消息中含有信息，我们通常所说的通信，是指传递含有信息的信息，因而也常常把消息与信息混用。

§ 1—3 通信的工作方式

当通信是在点与点之间进行时，按消息传送的方向与时序不同，无线电通信的工作方式分为下列几种：

一、单向通信

只能单方向传递消息的工作方式，称为单向通信，如图 1—4a 所示。广播、电视、遥控等就是一种单向通信方式。

近些年来，各个城市开发的无线电寻呼系统或称袖珍铃，就是一种单向无线电通信。它是利用无线信道传递一种寻人的单向信息。持有这种传呼接收机的用户在收到呼叫自己的信息后，即可通过附近的市话网与寻呼者沟通联系。有的寻呼系统，被寻者不仅可知是何人、何事及回叫电话号码，还可返回某些信息。

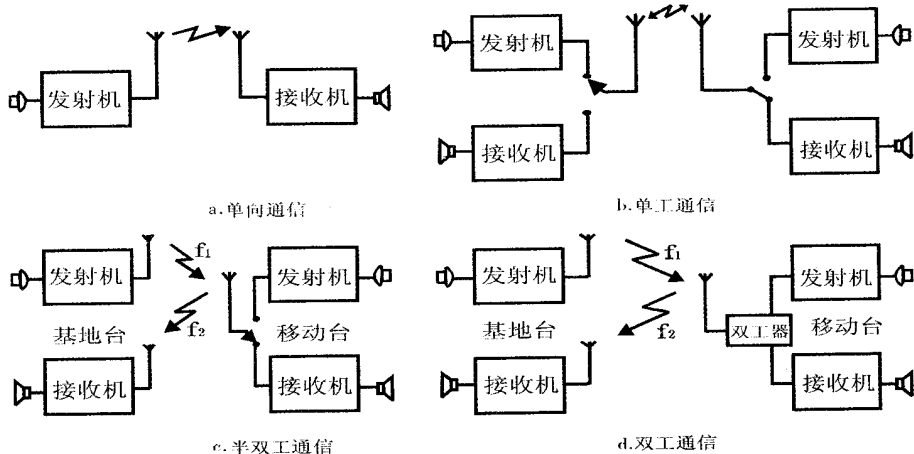


图 1—4 通信的工作方式

二、单工通信

单工通信是指通信双方都可以发信和收信，但各方收发只能交替进行，如图 1—4b 所示。即甲方发时，乙方只能收，不能发，反之亦然。通信双方只使用一副天线，由话筒按键控制收发信机的工作与天线的转换，即按键时发射机工作，松键时接收机工作。

单工通信可以是同频的，即收发共用一个频率；也可以是异频的，即甲台和乙台分别使用不同的发射频率，各个接收机则分别与对方的发射频率一致。单工通信各方只需使用一副天线，设备简单，收发信机交替工作，耗电省，适用于移动台工作。缺点是只能一方讲完，一方再讲，即使听不清也无法在对方讲话时插入讲话。

三、半双工通信

半双工通信是指通信的一方——基地台或主台采用双频双工工作，通信的另一方——移动台或属台采用双频单工工作，如图 1—4c 所示。基地台的收发信机同时处于工作状态，但频率不同，收发信机可以各用一副天线，也可以通过天线双工器合用一副天线。移动台是单工工作，仅用一副天线。移动台在收信时，可以根据需要随时按键插话、询问或要求对方重复某些内容，当然，移动台在插话时则接收机停止工作，收不到对方的讲话，因而称为半双工制。半双工通信和单工通信一样，可以使移动台设备简单，耗电省，缺点是通信时需占用两个信道。

四、双工通信

双工通信是指通信时双方的收发信机都处于工作状态，既可发，又可收，象打电话一样方便，如图 1—4d。通常基地台收发天线分开，异频工作。移动台可通过天线双工器共用一副天线。双工方式，操作方便，可同时收发，符合人们打电话的习惯，缺点是增加了设备负担，双方发射机都处于常发状态，不仅电源消耗大（对移运台来说负担大），而且会带来许多干扰，因而在使用上受到一定的限制。

无论是单工或双工、半双工使用异频工作时，对工作于不同频段的电台，收发频差有不同的要求。通常规定，在 150 兆赫频段，收发频差为 5.7 兆赫；450 兆赫频段，收发频差为 10 兆赫；①加注国际业余无线联盟推荐下差 900 兆赫频段，收发频差为 45 兆赫。并且规定由基地台或主台向移动台或属台发信为下行，发射频率高于接收频率；由移动台或属台向基地台或主台发信为上行，发射频率低于接收频率。

以上各种工作方式各有优缺点，对于某种通信系统来说，究竟选用何种工作方式，应视实际需要及设备条件而定。

前面所讨论的通信都是在点与点之间进行的，如果有许多用户，分布在不同的方位，需要进行相互联系时，则必须组成各种类型的通信网来实现通信要求。下面我们以常用的市话网为例，说明通信网的组成，从而建立通信网的初步概念。

图 1—5 是采用汇接制的市内电话网，各个用户线路分别接入所属的各个电话分局，分局设有交换设备，进

行线路或信息交换,并有中继线和市局汇接局相连,通过市局的交换设备与其它分局的用户接通,也可经长途台与外地的用户通话。

有线用户组网通信必须设置交换中心,通过自动或人工交换,沟通各用户间的通信。无线用户组网通信时,既可以象有线网一样,设控制交换中心,采取固定分配信道或共用信道方式,沟通网内各无线用户间的通信以及无线用户与市话网的连接,也可以不设控制中心,即采用无中心控制多信道共用体制。有关无线通信网的具体问题,我们不在本文中讨论。

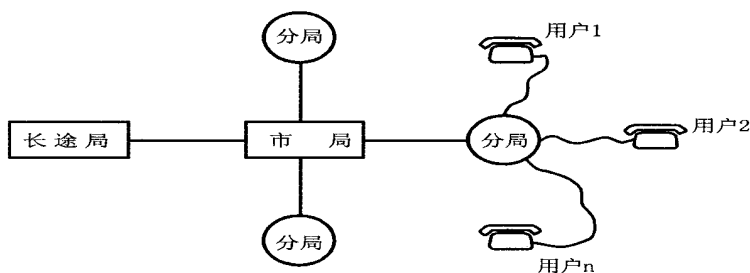


图 1—5 市话网示意图

§ 1—4 模拟通信与数字通信

通信中所传递的消息形式是多种多样的,如文字、符号、数据、语音和图象等等。然而,所有不同的消息,都可以把它们归纳为两类:一类称作模拟消息,一类称作离散消息。模拟消息是指消息状态是连续变化的,如强弱连续变化的语音,亮度连续变化的图象等。故模拟消息又称连续消息。离散消息是指消息状态是可数的或离散的,如文字、符号、数据等。

为了传递消息。必须将各种消息转换成相应的电信号,消息与电信号之间必须建立单一的对应关系,否则,在接收端就无法恢复出原来的消息。通常,消息被寄托在电信号的某一参量上。如果电信号的某一参量是对应于模拟消息而连续取值的,则称这样的信号为模拟信号或连续信号。如图 1—6,就是通过送话电路将话音转换为相应的连续变化电流。传输这种模拟信号的通信,就称为模拟通信。象普通的有线电话和无线电话,多属于模拟通信。

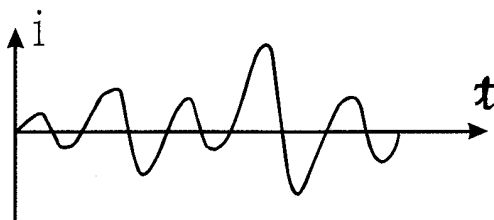


图 1—6 连续信号

如果电信号的参量携带着离散消息,则该参量必将是离散取值的,这样的信号就称为离散信号,离散信号通常用二进制符号“1”和“0”来表示,又称为数字信号。例如,电传机输出的有电无电脉冲,通过不同的组合来代表不同的数字或字母。图 1—7 组合的“11001”,就是国际通用的五单位电码的“W”字。传输这种数字信号的通信,就称为数字通信。

数字通信除用于传送电报、数据等离散消息外,也可以用于传送连续消息。这需要用一种模——数转换装置(称为编码器)将模拟信号变换为数字信号来进行传输。在接收端则通过一种相反的数——模转换装置(称为译码器)再还原为模拟信号。例如,数字电话就是这样。图 1—8 是数字通信系统的模型,发信末端将消息源转换为相应的电信号,编码器则将模拟信号转换为相应的数字基带信号,调制器则将数字基带信号转换为适于信道传输的频带信号。收信端则是以相反的过程还原为消息。这里再次说明一下,无论是模拟通信或数字通信,我们把调制以前的电信号,称为基带信号,而把调制后送入信道的已调信号,称为频带信号。另外,数字通信中还有很重要的同步问题,加密与解密问题等,图 1—9 均没有显示、这些不在本文中专门讨论。

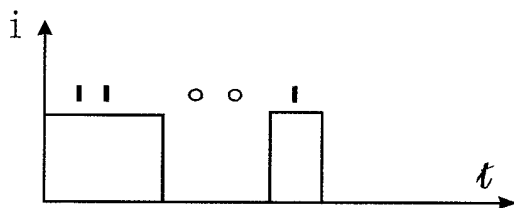


图 1—7 数字信号

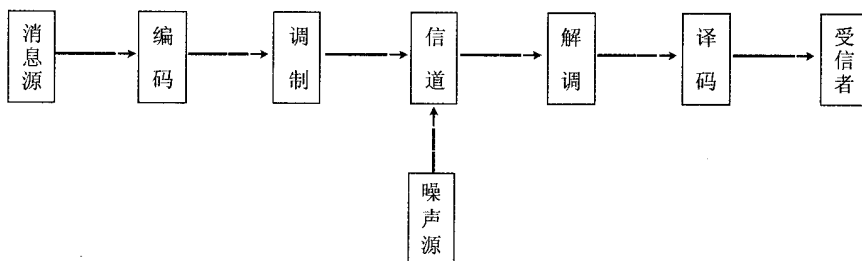


图 1—8 数字通信系统模型

在数字通信中,并非所有实际系统都要经过上述几种变换过程。例如市区内的有线电报或电传,则不必经过调制和调解过程,而让基带信号直接进行传输。但无论是连续消息或离散消息,都必须经过末端或终端设备完成消息与数字基带信号间的转换。

在数字通信中,我们用相同的时间间隔来表示一个二进制或 N 进制信号,这个间隔叫码元长度,简称码元。每秒钟传送码元的数目叫传输速率(传码率),单位为波特,用符号 B 表示。如某通信系统每秒传送 4800 个码元,则称其传码率为 4800B。在二进制情况下,一个码元含有 1 比特的信息量,以 $b(\text{bit})$ 表示。每秒钟传送信息量的

多少,称为信息速率或传信率,单位是比特/秒,以 b/s 表示。可见,在二进制情况下,传输速率与信息速率在数值上是相等的,但它们在概念上是有区别的。

在通信设备中,选呼系统也有用数字信令进行传输。如某设备的传信率为1200比特/秒,就是说它每秒钟传送1200个二进制码元。

无论是模拟通信或数字通信,都是已经获得广泛应用的通信方式。在通信发展的一个很长历史时期中,模拟通信占据主要地位,模拟通信的技术设备也比较完善。但是,在本世纪中叶以后,数字通信发展很快,甚至目前出现了数字通信要超越模拟通信的趋势。这是因为和模拟通信相比。数字通信能较好地满足对通信越来越高的要求,其主要优点是:第一,数字传输的抗干扰(或噪声)能力强,尤其在中继时,数字信号可以再生而消除噪声的积累;第二,传输中的差错可以设法控制,有效地改善了传输质量;第三,便于使用现代计算技术对数字信息进行处理;第四,数字信息易于加密,保密性强;第五,数字通信可以传递各种消息,使通信系统变得通用而灵活等等。上述优点是数字通信获得迅速发展的主原因,而数字电路元、部件的发展和计算机、微处理器的广泛应用则为数字通信的高速发展创造了条件。

但是,数字通信的许多优点是用比模拟通信占据更宽的系统频带换来的。以电话为例,一路模拟电话通常只占据4KHz的带宽,而一路数字电话可能要占据20~60KHz的带宽。因此,数字通信系统的频带利用率不高,在系统频带紧张的场合,数字通信的这一缺点更显得突出。这好象在有限宽度的公路上,汽车车身的宽度增加,必然使能并排通行的车辆数减少。然而,随着社会生产力的发展,有待传输的数据量急剧增加,对传输的可靠性与保密性要求也越来越高,往往宁可牺牲系统频带而采用数字通信。至于在系统频带较宽裕的场合,如毫米波通信,光纤通信等,应用数字通信,几乎成了最佳选择。

尽管发展数字通信是大势所趋,然而,考虑到现有的设备多数是模拟通信设备这一事实,在今后相当一段时间内,模拟通信还要充分应用,只是在建立通信线路、电路时(主要指固定通信设备),要尽量做到数模兼容,以便创造条件,逐步向以数字通信为主的通信方式过渡。

§ 1—5 通信的发展概况

虽然通信的起源可以追溯到几千年以前的人类社会,但是应用电能来进行通信,则是近一百多年的事情。

1837年,美国人莫尔斯(F. B. Morse)在纽约首次表演了他制作的电磁式电报机,这种在电学和磁学知识基础上出现的简单有线电报通信,揭开了现代电通信的序幕。1876年,美国波士顿大学教授贝尔(A. G. Bell)发明了电话,开始形成了以金属导线作为传输媒质的简单的有线电话通信。1873年,英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)总结了十九世纪中叶以前人们对电磁现象的研究成果,发表了著名的电磁理论,建立了电磁场的基本方程,从理论上证明了电磁过程在空间是以相当于光的速度传播的,从而彻底否定了超距作用的错误观念,

并得出光的本质是电磁波的结论。1887年,德国物理学家赫兹(H. Hertz)发表电磁波的发生与接收论文,以卓越的实验成就证实了电磁波的存在,为探索无线电通信开辟了通路。1895年,俄国人波波夫(A. C. nonoB)和意大利人马可尼(G. Marconi)分别成功地进行了无线电通信试验。1901年,利用长波的无线电波实现了从欧洲到美洲横跨大西洋的远距离无线电报通信。

二十世纪初,电子管等器件问世后,使通信技术获得迅速的发展。二十年代,开始有了长波和中波的无线电广播,三十年代开始有了电视。短波通信由于其相对体积小、通信距离远等优点,于二十年代后期开始广泛发展。在第二次世界大战中,由于雷达的出现,雷达所应用的超短波和微波技术得到了飞跃的发展,因此,在第二次世界大战以后,微波通信特别是大通路微波接力干线通信发展很快。

1957年由苏联发射的世界上第一颗人造地球卫星上天,使人们向往已久的利用同步卫星进行全球无线电通信的科学设想成为可能。1965年,世界上第一颗商业性的国际通信卫星IS—I发射成功,卫星通信开始进入实用阶段。

由于军用和民用无线电通信的广泛应用,有限的频率资源愈来愈显得不够分配,为解决空间电磁波的拥挤问题,迫使人们不断开发新频段。目前城市移动通信多使用米波及分米波段,卫星通信多使用厘米波段,毫米波通信乃至具有巨大潜力的光通信,愈来愈受到人们的重视。

应该看到,无线电通信在向着更高频率,更短波段进军的同时,对长波,超长波的开发应用也未放松,特别是为了解决对入海的潜艇指挥问题,能穿透海水的甚低频乃至极低频通信,一直被各国所重视。

由于人类社会的发展,经济建设和国防建设的需要,对通信的要求愈来愈高,从而推动了通信科学理论和技术的发展。从二十世纪三十年代开始,特别是五十年代以后,人们对通信实践中遇到的问题开展了深入的理论研究,并获得了可喜的成果。

在通信体制上,由于电子管的不断完善,晶体管和集成电路相继问世,特别是大规模集成电路的发展和广泛应用,电子计算机、微处理器与通信设备的结合,使通信技术和通信方式有了重大的突破,并促进了数字通信的发展。

现在的通信不仅已经打破了有线与无线的界限,而且也打破了仅是人与人之间进行通信的旧概念,实现了人与机器或机器与机器之间的通信。

第二章 交流电与电磁波

§ 2—1 交流电的有关参量

无线电通信是利用无线电波来传递信息的,而无线电波又是靠高频交流电产生的交变电磁场向空间辐射形成

的。为了使无线电波传送信息，必须将待传送的信息或其对应的电信号对高频交流电的某一参量进行调制，使其“携带”信息。因此，为了更好地了解无线电信号的产生、辐射、传播与接收过程，考虑到有的读者可能缺少必要的基础知识，有必要对物理课中所涉及的交流电的主要参量及其相互关系作简略的叙述。

一、交流电的瞬时值，最大值与有效值

我们知道交流电的大小，方向是随时间变化的，图 2—1 所示的正弦交流电流或电压可用下列表示式来表述：

$$i = I_m \sin \omega t \text{ 或 } u = U_m \sin \omega t$$

式中， i 、 u 分别代表交流电流、电压的瞬时值，它是时间的函数。

I_m 、 U_m 分别代表交流电流、电压变化的最大值，通常称为振幅。

同直流电一样，交流电流的单位为安培(A)，常用的较小单位为毫安(mA)，它们的关系是：A 1, 000mA

交流电压的单位是伏特(V)，常用的较小单位是毫伏(mV) 和微伏(μ V)，它们的关系是：

$$1V = 1,000mV = 1,000,000\mu V$$

一般无线电接收机的灵敏度常以微伏来表示。例如，某接收机的灵敏度为 $1\mu V$ ，则表示该接收机由天线接收到所需信号的感应电势达到 $1\mu V$ ，就可以正常工作。

如果要计算交流电作功的大小，可以把交流电与具有同等作功能力的直流电等效，这个等效的直流电数值，就称为交流电的有效值。分别用 I 、 U 表示。根据计算，有效值与最大值的关系是：

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

我们通常所说的市电电压 220V，是指它的有效值，它的最大值则是：

$$U_m = \sqrt{2} U = 1.414 \times 220 = 311.1V$$

这样，当已知交流电流、电压的有效值或振幅时，则交流电的功率是：

$$P = UI = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} U_m I_m$$

$$\text{或 } P = I^2 R = \left(\frac{I_m}{\sqrt{2}} \right)^2 R = \frac{1}{2} I_m^2 R$$

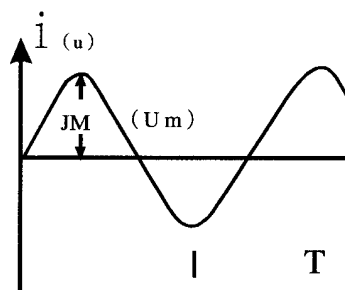


图 2—1 正弦交流

设某发射机天线的输入电阻为（欧姆），发射机输入天线的等效电流为 0.45A，则其功率为：

$$P=I^2R=(0.45)^2 \times 50=10W$$

有必要说明的是：天线的等效输入电阻中包括有辐射电阻和损耗电阻，只是辐射电阻吸收的功率才是电台的发射功率。辐射效率的高低和天线型式、工作频率等因素有关。

二、交流电的频率、周期和角频率

交流电从零变到最大值，再变到零，再从反方向变到最大值，再变到零，叫做一周。交流电每秒变化的周数，叫做频率，以表示。频率的基本单位是赫兹，1 赫兹就是每秒变化一周。频率的常用单位有千赫（KHz），兆赫（MHz）和吉赫（GHz）。它们的关系是：

$$1\text{GHz}=1.000\text{MHz}=1,000,000\text{KHz}=10^9\text{Hz}$$

交流电每变化一周所需的时间，叫做周期，以 T 表示。周期的基本单位是秒（s），常用单位有毫秒（ms）、微秒（μs）和毫微秒（ns）。周期和频率互为倒数，即

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{或} \quad f = \frac{1}{T}$$

例如，市电的频率为 50Hz，则其周期为

$$T = \frac{1}{50} = 0.02\text{s} \text{ (秒)}$$

某高频交流电的频率为 500MHz，则其周期为

$$T = \frac{1}{500 \times 10^6} = 0.002 \times 10^{-6}\text{s} = 0.002\mu\text{s} \text{ (微秒)}$$

即其周期为千分之 2 微秒，或者说是 2 毫微秒。

由于频率是每秒变化的周数，而每周是 360 度或 2 弧度，因此，每秒变化的角度应是 2π 与频率的乘积。这个每秒变化的角度就叫角频率或角速度，以 ω 表示，则

$$\omega = 2\pi f$$

π 是常数，等于 3.1416，因而有时也用角频率来代表交流电的频率。

三、交流电的相位

交流电在任一时间的电角度，称为相角或相位，以 φ 表示。 φ 是时间的函数，因而通常表示为 (t) 。显然，

$$\varphi(t) = \omega t = 2\pi f t = 2\pi \frac{t}{T}$$

例如，图2—1中，当时间为 $\frac{T}{4}$ 时，相角为 $\frac{\pi}{2}$ ，即 90 度；当时间为 $\frac{T}{2}$ 时，相角为 π ，即 180 度。

交流电的几个主要参量：振幅、频率和相位，都可以作为调制的对象，使其“记载”信息，于是有振幅调制（AM）、频率调制（FM）和相位调制（PM）之分，这些是我们在通信原理中要讨论的主要内容之一。

§ 2—2 电磁波

一、电磁场与电磁波

我们知道，静电荷在其周围空间产生静电场，直流电流在其周围空间产生恒定的磁场，如图 2—2 所示。交

流电流则在其周围空间产生交变的电场和磁场。

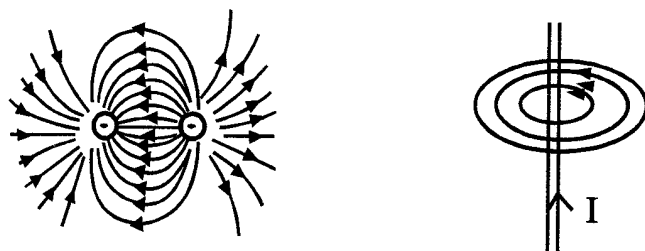


图 2—2 静电和直流磁场

变化的电场和磁场是相互联系着的，相互依存，相互转化。在电磁场里，磁场的任何变化会产生电场，电场的任何变化会产生磁场。交变的电磁场不仅可以存在于电荷、电流或导体的周围，而且可以脱离产生电磁场的能源向远处传播。这种在空间以一定速度传播的交变电磁场，就称为电磁波。电磁波是一种特殊形态的物质，广泛地存在于整个宇宙中。

为了使电磁场能离开能源，向周围空间辐射，我们常用两端张开的导线作为天线，用发射机从中间向它馈送高频电能，如图 2—3a 所示。这时在天线两端聚集着异性电荷，并随高频电流的大小和方向变化作相应的变化，从而在天线周围产生交变电场，交变电场在其附近产生交变磁场，交变磁场又在周围产生交变电场，交变电磁场不断地相互产生，电力线和磁力线犹如环环相扣的链条，互相垂直交链，构成了统一的电磁场，向四面八方辐射，就成为电磁波。图中实线表示电力线，虚线表示磁力线。

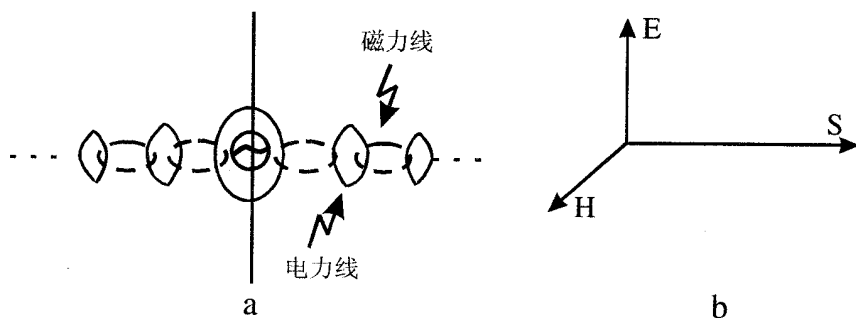


图 2—3 电磁波及其传播方向

图2—3b表示电场方向 $\vec{E}$ 、磁场方向 $\vec{H}$ 和传播方向 $\vec{S}$ 在空间相互垂直，彼此成90度。三者的关系符合右手定则，即以右手四个手指伸直指向电场 $\vec{E}$ ，手心向着磁场 $\vec{H}$ ，则大拇指张开就是指电波传播方向 $\vec{S}$ 。

为了使天线能有效地将高频电能转换为向空间辐射的高频电磁波，天线应是开放的系统，并且对工作波长而言，应具有足够的长度，这样在馈电源的高频激励下，分散在周围空间的电场及磁场能量来不及相应收缩，就以

电磁波的形式，将能量向四周扩散。

二、电波的极化

电波的极化是指电波在传播中电场的方向随时间变化的方式。电场的方向和地面垂直的电波，称为垂直极化波，一般直立天线发射的电波就是以垂直极化波为主。电场的方向和地面平行的电波，称为水平极化波，一般水平天线发射的电波就是以水平极化波为主。垂直极化波和水平极化波均属于线性极化波。如果在电波传播方向的垂直平面上，电场的方向随时间成圆形或椭圆形变化，则称为圆极化波或椭圆极化波。一般螺旋天线及按一定相位关系馈电的相互正交的引向天线阵可辐射圆极化波。

接收天线与发射天线的极化必须互相适应即达到极化匹配，才能有良好的接收效果。否则将产生极化损耗，使天线不能有效地接收。用线极化天线发射与接收时，应注意是垂直极化还是水平极化，要取得一致；用线极化天线接收圆极化波时，效果较差；用圆极化天线则可以接收任意取向的线极化波；用圆极化天线接收圆极化波时，还要注意两者的旋转方向一致。由于天线的可逆性，发射天线与接收天线在极化方向上也是一致的。

需要说明的是，电波的极化并非恒定不变的，电波在传播过程中，由于各种因素的影响，电波的极化也会有某些变化。例如，沿地表面传播的垂直极化波，受地表面感应电流的影响，会产生电场的水平分量。

三、频率和波长的关系

同交流电一样，电磁波每秒变化或振动的次数叫频率，它和馈送到天线上的高频交流电的频率是一致的。电磁波每变化一周所传播的距离，叫波长，以 λ 表示。如图 2—4，相邻两波峰或相邻两波谷的距离，就是一个波长。波长的单位是米(m)。

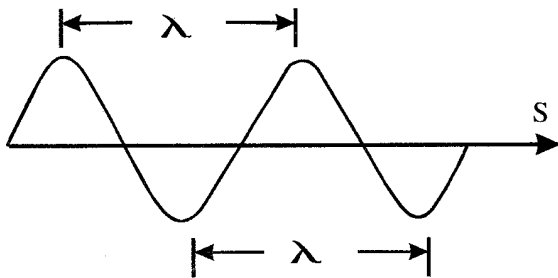


图 2—4 电磁波的波长

电磁波在空间传播的速度 V 大体上和光速相等，即

$$V = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

即每秒 30 万公里。这样我们可以得出电磁波的频率，波长和速度三者之间的关系：

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \times 10^8}{f} \text{ (米)}$$

当频率的单位用赫兹时，波长的单位是米。如果频率的单位用兆赫，波长的单位仍用米，则上式可简化为：

$$\lambda = \frac{300}{f}$$

由于波速是常量，波长和频率是反比关系。频率越高，其波长越短。例如，某特高频（UHF）电台工作频率为 500 兆赫则其波长为

$$\lambda = \frac{300}{500} = 0.6\text{m}$$

即波长为 60 公分。

又如：某种光通信的波长为 100 微米，即 10^{-4} 米，则其频率为

$$f = \frac{3 \times 10^8}{10^{-4}} = 3 \times 10^{12}\text{Hz} = 3000 \times 10^9\text{Hz} = 3000\text{Ghz}$$

四、电磁波谱

电磁波包括的范围很广，通常所说的无线电波是指从几十千赫到几万兆赫的电磁波。红外线、可见光、紫外线、X 射线、r 射线等都属于电磁波的范畴。它们的频率不同，产生的方法不一样，特性和作用也有很大的差异，例如，X 射线和 r 射线因波长极短而能穿透人体，可见光因不同的波长而具有不同的颜色，无线电波也因不同的波长而具有不同的性质和用途，它们有一个共同的属性，即都是在空间传播的交变电磁场。

表 3-1

电 磁 波 谱

名 称	波 长 范 围	频 率 范 围
无线电波	长于 1 毫米	小于 300 吉赫
红 外 线	1000—0.78 微米	300— 3.84×10^5 吉赫
可 见 光	0.78—0.39 微米	$(3.84 \sim 7.7) \times 10^5$ 吉赫
紫 外 线	0.39—0.01 微米	$7.7 \times 10^5 \sim 3 \times 10^7$ 吉赫
X 射 线	$10^{-2} \sim 10^{-5}$ 微米	$3 \times 10^7 \sim 3 \times 10^{10}$ 吉赫
r 射 线	$10^{-5} \sim 10^{-9}$ 微米	$3 \times 10^{10} \sim 3 \times 10^{14}$ 吉赫

§ 2—3 无线电波的波段划分

我们从通信的发展简史中知道，无线电通信大致经历了从长波、中波、短波、到超短波、微波的发展过程，为了适应无线电通信事业的发展，增大通信容量和解决某些特种通信的需要，人们仍在不断开发新的频率领域，为无线电通信提供更多的频率资源。表 3—2 列出了无线电波频段和波段的划分与命名。其中 300KHz 以下的低频至超低频段，用地波传播时，绕射能力强，地面衰耗小，穿透海水能力较强，信号稳定可靠，主要用于导航、岸对远洋舰船及对潜艇通信。中频段用地波传播时，信号稳定，但传播距离较近，主要用于国内广播和导航。高频段用天波传播时，可作远距离通信，但受电离层变化的影响大，信号不够稳定，主要用于远距离通信和广播。

甚高频乃至极高频段，主要用直射波传播。传播距离一般为视线距离，但可通过接力或散射作较远距离通信，主要用于移动通信、卫星通信、微波接力通信以及电视、雷达等方面。

表 3-2 无线电频段和波段命名

段号	频段名称	频率范围 (含上限, 不含下限)	波段名称	波长范围 (含下限, 不含上限)
1	极低频	3—30赫 (Hz)	极长波	100—10 兆米
2	超低频	30—300 赫 (Hz)	超长波	10—1 兆米
3	特低频	300—3000赫 (Hz)	特长波	100—10 万米
4	甚低频 (VLF)	3—30 千赫 (KHz)	甚长波	10—1 万米
5	低频 (LF)	30—300 千赫 (KHz)	长波	10—1 千米
6	中频 (MF)	300—3000 千赫 (KHz)	中波	10—1 百米
7	高频 (HF)	3—30 兆赫 (MHz)	短波	100—10 米
8	甚高频 (VHF)	30—300 兆赫 (MHz)	米波	10—1 米
9	特高频 (UHF)	300—3000 兆赫 (MHz)	分米波	10—1 分米
10	超高频 (SHF)	3—30 吉赫 (GHz)	厘米波	10—1 厘米
11	极高频 (EHF)	30—300 吉赫 (GHz)	毫米波	10—1 毫米
12	至高频	300—3000 吉赫 (GHz)	丝米波	10—1 丝米

(未完待续)



无线电通信基本原理

编者按：本教材是北京市无线电管理委员会（现北京市无线电管理局）在 1988 年编印的。全部内容共分八章，简明扼要、深入浅出地阐述了无线电通信的概念、电磁波基本知识、收发信机的组成，电波传播以及干扰等无线电基础知识，曾被北京市无线电管理委员会作为培训北京市各机关、企、事业单位通信管理人员的专用教材。《业余无线电家》将陆续刊登该教材的部分内容，供广大无线电爱好者自学、参考。（接上期）

第三章 发射机

§ 3—1 发送设备与发射机的组成

一、无线电发送设备的组成

一套完整的无线电发送设备，应该包括下列几个组成部分(见图 3—1)：末端设备 其作用是将要传送的信息，转换成相应的原始电信号。发送无线电话的末端设备就是送话器，或叫话筒，它将话音转换成相应的话音电流。

发射机 是发送设备的主体，其作用是将原始电信号进行某种变换，使其适于在无线电信道中传播，并赋予以足够的功率，使其能传播较远的距离。

天线及馈线设备 其作用是将携带有信息的高频电能转换为高频电磁波向空间辐射。

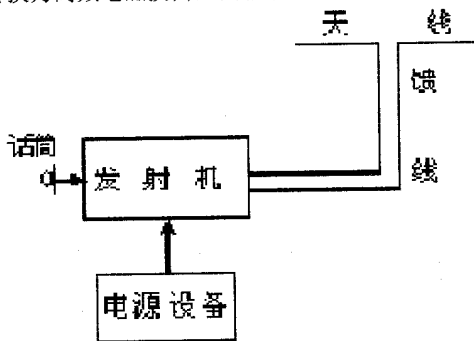
电源设备 供给各部分所需要的电能，如干电池、蓄电池或通过整流稳压设备将交流电源转换为电台所需要的直流电源。

对于小型移动电台特别是手持机来说，上述各组成部分包括接收部分常常是合为一体的。其天线通常用鞭状天线，直接和发、收信机相连；电源通常用镍镉密封蓄电池，装在发、收信机的底部；末端设备就是送话器。因而，我们对发射设备或接收设备主要讨论它的主体即发射机或接收机的功能、组成及各部分的作用。

二、话音电流及其频谱

我们对着话筒讲话时，由送话电路产生的话音电流，它是随着人们讲话时的声音大小及频率高低而变化的。人耳可闻的频域是比较宽的，约从 10 赫到 20,000 赫，因而称这一段频率为音频，但一般人们讲话时频域则没有这么宽，主要能量集中在 300~3000 赫这个范围内。只要能传送这一段频谱，就可以听清语音信息的内容及其特征。所以，我们在通信上把要传送的话音频谱，限定为 300~3000 赫。压缩话音频谱不仅可降低对电路的要求，而且传送每路话的频带愈窄，则相邻各信道之间的间隔可以愈小，在有限的频率范围内，能提供的信道数就愈多，有利于提高频率利用率。

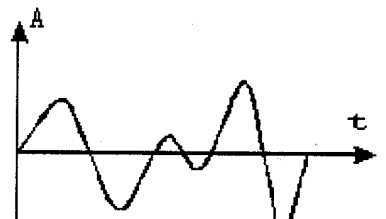
图 3—2a 是话音电流的波形，图 3—2b 则是一般话音电流的频谱图。所谓频谱图，就是用横坐标表示频率，纵坐标表示各频率分量的振幅，将信号中各频率分量显示出来。从图中还可以看出，话音频谱中低端能量较强，高端能量较弱，因而又常用简单的能量梯形来表示话音频谱，如图 3—2c 所示。



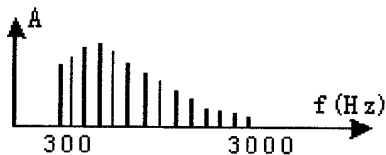
语音频谱中, 在 1000 赫附近能量最为集中, 因而常常用 1000 赫的音频作为标准调制信号, 进行无线电收发机主要技术性能的测试。

三、发送设备的任务

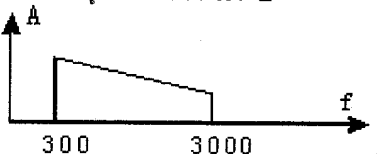
我们不能把语音电流直接送入无线电信道进行传输, 这是因为语音电流的频率太低, 或者说波长太长, 我们在前一章讲过, 要使天线能有效地辐射电磁波, 天线必须是开放的导体, 而且其尺寸要能与工作波长相比拟, 例如四分之一一个波长。而语音频谱的波长是 1000 公里到 100 公里, 架设如此庞大的天线设备是不可想象的。同时, 每个人讲话的频谱都基本上是相同的, 接收时又如何区分呢? 因而需要对语音电流进行某种变换, 才能送入无线电信道。这种变换, 叫做调制, 就是用语音电流去控制高频振荡的某一参数(振幅、频率或相位), 使其随语音电流的瞬时值而变化。我们把要发送的语音信号, 称为音频调制信号, 或简称调制信号, 把已受调制即“记载”有调制信号的信息的高频振荡称为高频已调信号, 又叫频带信号。接受调制前的高频振荡称为载频或载波。多部发射机同时工作时, 只要各自调制时选用的载频频率不同或调制方式不同, 它们就会各行其道, 互不干扰。



a. 语音电流



b. 语音频谱



c. 语音频谱的能量梯形

图 3-2 语音电流及其频谱

这样, 我们可以把传送一路模拟话的无线电发送设备的任务概括为三大转换, 即:

1. 通过送话器把语音转换为相应的语音电流, 即将声能变为电能;
2. 通过调制器把语音电流转换为相应的高频已调信号, 即将低频电能变为高频电能;
3. 通过发射天线把已调高频信号转换为高频电磁波向空间辐射, 即将高频电能变为电磁能。

四、发射机的基本组成

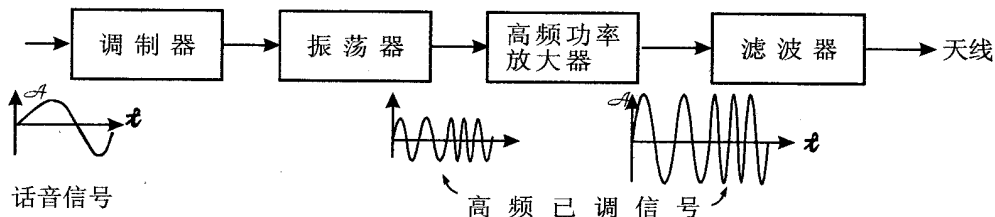


图3—3 发射机组成示意图

发射机是无线电发送设备的主体, 它处于话筒和天线馈线之间, 要完成从低频电能到高频电能的转换, 并以足够的高频功率输送到天线, 它必须具有以下基本组成部分:

(一) **振荡器** 产生稳定的高频等幅振荡, 提供调制需要的载频, 为了提高振荡频率的稳定度, 现代发、收信机都设有频率合成器的装置。它是由石英晶体振荡器所产生的某一标准频率信号, 经过分频及数字锁相环路、控制可变频率振荡器 (VFO 或 VCO) 的频率, 从而得到频率稳定度较高而且可以按照一定的间隔调整的可变频率。

关于频率合成器的基本原理, 我们将在后面作简要介绍。

(二) **调制器** 控制高频振荡的某一个参数, 以便得到高频已调信号, 如果是控制高频振荡的频率, 通常是

在振荡级进行调制；如果是控制高频振荡的振幅，通常是在发射机的末级即高频功率放大器进行调制。

(三)高频功率放大器 它是在高频已调信号的控制下，将电源供给的直流电能转换为高频电能，以足够的高频功率输送给天线。

(四)滤波器 抑制信号频带以外的杂波辐射，以免干扰其它电台的工作。

当然，发射机的实际组成远不止上述这些。例如，调制之前有多级低频放大器，末级功率放大之前有多级中间功率放大器或缓冲，倍频器，至于滤波器也不是只在末级输出电路才有。图 3—3 只是为了显示发射机的基本功能而作出的组成示意图。

发射机的基本功能，也就可以概括为四句话，即产生高频振荡，控制高频振荡，输出高频功率，抑制杂波辐射。

§ 3—2 振幅调制

一、调幅及调幅发射机

用要发送的话音信号控制高频振荡的振幅，使其振幅随话音信号的瞬时值而变化，称为调幅(AM)。如图 3—4，a 为调制信号，即要发送的话音信号，b 为载波，即振荡器产生的高频等幅振荡，c 为振幅已调的高频信号，称为调幅波。由图可见，调幅波振幅变化的包络线是和调制信号的瞬时值相对应的，因而调幅波“记载”着信息。

调幅时，通常在发射机的末级功率放大器即输出放大器进行。图 3—5 是调幅发射机的基本组成方框图。其各级作用如下：

振荡器 产生高频等幅振荡。

缓冲放大器 减轻后级负载对振荡的影响，提高振荡频率的稳定度。

激励放大器 是处于末级之前的一级中间功率放大器。激励也就是推动的意思，它给末级提供足够的激励电压和激励功率，以推动末级功率放大器的工作。

有些发射机，在振荡级之后，末级或末前级之前，设置 1~2 级倍频器，以展宽频率范围，并有利于提高振荡频率的稳定度。例如，某短波电台将振荡器的振荡频率范围设计为 1~2MHz，经过乘 2 倍频器，展宽为 2~4MHz，再通过设有波段开关控制的第二倍频器，分别作乘 1，乘 2 或乘 3 输出，则各波段的输出频率为：

波段 1 (乘 1): 2~4MHz

波段 2 (乘 2): 4~8MHz

波段 3 (乘 3): 6~12MHz

去掉其重叠部分，该发射机总的频率范围为 2~12MHz，这比原来的振荡频率范围宽多了。振荡器的振荡频率较低，调整范围较窄，易于采取稳频措施提高频率稳定度。在有些机器上，倍频和缓冲是合二为一的。

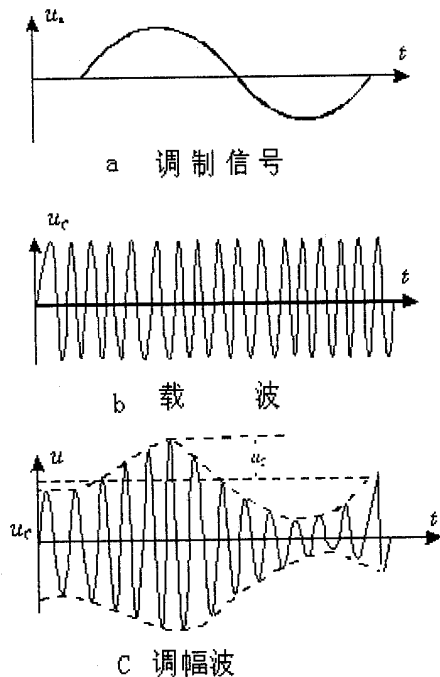


图 3—4 调幅波

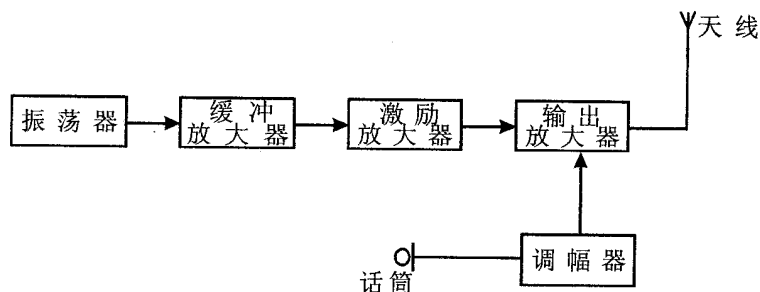


图 3—5 调幅发射机方框图

输出放大器 它是发射机的末级，又称强放级，其作用是在前级高频振荡电压和功率的推动下，产生足够的高频功率输送给天线。本级在发话时，又是受调放大器，接受话音信号的调制，输出调幅波。本级的输出电路，通常设有阻抗变换及选频滤波装置，以便使放大器的输出阻抗和天线输入阻抗相匹配，并抑制杂波发射。

调幅器 它实际上是一级或多级低频放大器。其作用是放大话音信号，要的音频电压和功率。提供调制时所需要的音频电压和功率。

二、调幅度

振幅调制时，为了衡量调制信号对载频的调制程度，我们用调幅度这一名词来表述。调幅度常用 m_a 来代表，其定义是：调幅波振幅变化的最大值与载波振幅之比，以百分数表示，即(见图 3—4C)：

$$m_a = \frac{\Delta U_c}{U_c} \times 100\%$$

当载频振幅一定时，调幅度的大小决定于调幅波振幅变化的最大值，而后者又和音频调制电压的振幅成正比。即

$$\Delta u_c = K u_\Omega$$

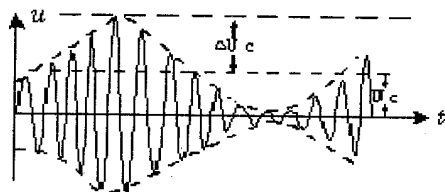
即载频振幅一定时，音频调制电压愈大，则调幅度愈大，即调制愈深， K 是由调幅电路所决定的一个常量， K 的大小反映调幅的灵敏程度。

调幅时，我们是通过调幅波的振幅变化来传送信息，当然我们希望在可能的情况下，调幅度大一些好。

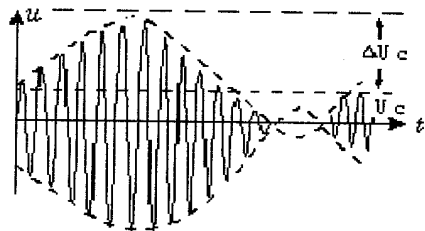
如果调幅波振幅变化的最大值 ΔU_c 与载频振幅 U_c 相等，即 $\Delta U_c = U_c$ ，则 $m_a = 1$ ，即百分之百的调幅，称为满调幅，如图 3—6a 所示。满调幅是最理想的也是所能允许的最大调幅。

如果调幅波振幅变化的最大值 ΔU_c 大于载频振幅 U_c ，则 $m_a > 1$ ，称为过调幅。过调幅时，调幅波振幅的外沿变化就和音频调制信号不一样了，即产生了失真，这是我们应当避免的。使用调幅发射机对着话筒讲话时，如声音过大，可能产生过调幅，失真严重，反而听不清。

人们讲话时，声音的强弱变化往往是很大的，为了使较强的声音不产生过调幅，则较弱的声音调幅度必然较小，因而发话时的平均调幅度是比较低的，约为 30% 左右。



a 满调幅



b 过调幅

图 3—6 满调幅与过调幅

三、调幅波的频谱

调幅波的振幅和音频调制信号的大小成线性变化，但这并不是说调幅波是由载频和音频叠加而成的，或者说调幅波中含有音频。调幅波中究竟含有哪些频率成分，我们可以通过简单的数学分析来说明。

设载频电压是：

$$u_c = U_c \cos \omega_c t \quad \omega_c \text{ 是载频角频率。}$$

音频调制电压是：

$$u_\Omega = U_\Omega \cos \Omega t \quad \Omega \text{ 是音频角频率}$$

为简单起见，我们假定调制频率是单一的音频。调制后，高频电压 u （即调幅波）的振幅随音频调制信号的大小成线性关系变化，调幅波的振幅应是： $u_c + \Delta u_c \cos \Omega t$ 。所以调幅波 U 的表示式是：

$$\begin{aligned} u &= (u_c + \Delta u_c \cos \Omega t) \cos \omega_c t \\ &= u_c \left(1 + \frac{\Delta u_c}{u_c} \cos \Omega t \right) \cos \omega_c t \\ &= u_c (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_c t \end{aligned}$$

我们运用积化和差的三角公式，将上式变换一下，就可得出：

$$u = u_c \cos \omega_c t + \frac{1}{2} m \cdot u_c \cos (\omega_c + \Omega) t + \frac{1}{2} m \cdot u_c \cos (\omega_c - \Omega) t$$

可见，用单一音频调制的调幅波中，包含有这样一些频率成分：载频 ω_c ；载频与音频之和，即 $\omega_c + \Omega$ 我们称为上边频；载频与音频之差，即 $\omega_c - \Omega$ ，我们称为下边频。上边频和下边频，分布在载频两侧，和音频有关，但不是音频。也就是说，调幅波中不含音频分量。

边频的振幅 ($\frac{1}{2} m \cdot u_c$) 与音频调制信号的振幅成正比，边频的频率与音频调制信号的频率作线性变化，也就是说音频已“记载”在调幅波的上下边频中。边频携带有信息，载频只是起运载工具的作用，不携带信息。

这里说明一下，角频率 ω 与频率 f 相差一个常数 2π ，即 $\omega = 2\pi f$ 即为了表述问题方便，我们常常就用 ω 及 Ω 来代表高频 f 及音频 F 。

调幅波的频率分量，可以用频谱图来表述。图 3—7 是单一音频 F 调制载频 f_c 的频谱图。

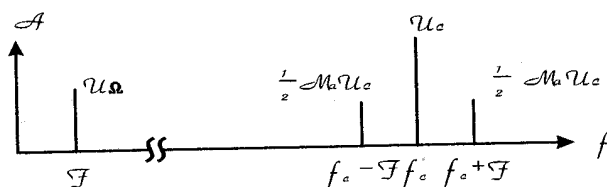


图 3—7 单一音频调幅的频谱图

例如，调制音频为 1KHz，载频为 5KHz，则上边频为 5001KHz，下边频为 4999KHz。

如果用 300~3000Hz 的话音频去调制一载频，则调幅波中含有许多对上下边频。称为上，下边带，图 3—8 是用话音信号调制时的频谱图。

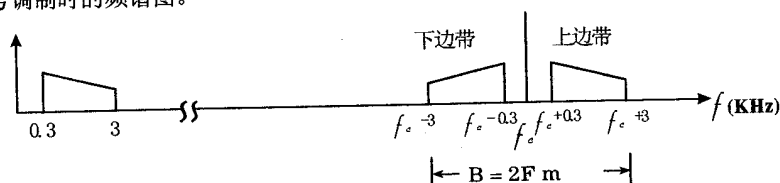


图 3—8 话音信号调幅的频谱图

同样,我们假定载频频率为 5MHz,话音频带为 300~3000Hz,即 0.3~3KHz,则调幅后的上边带为 5000.3~5003KHz,下边带为 4997~4999.7KHz。

已调信号所占据的频带宽度,称为信号的带宽,以 B 表示,在调幅波中,它等于最高调制音频 F_m 的两倍,即: $B = 2 F_m$

例如,上例中最高音频为 3KHz,则调幅波的带宽为 6KHz。要求传送的最高音频愈高,则传送一路话时占据的频带愈宽。一般无线电话中,限定最高音频为 3KHz,而无线广播中,要求传送音乐,音乐的频域较宽,广播信号的带宽也相应增大。

四、调幅波功率

(一) **载波功率** 当按下话筒开关不发话时,发射机只输出载波,即只有载波功率输出,我们把载波变化一周的平均功率称为载波功率。

设载波电流的振幅为 I_c ,末级输出放大器的等效负载电阻为 R ,则载波功率 P_c 为:

$$P_c = \frac{1}{2} I_c^2 R$$

(二) **峰值功率** 调幅波振幅最大时,高频一周的平均功率,为最大功率状态,叫峰值功率 P_m 。由于最大状态时,调幅波的振幅为:

$$I_a + \Delta I_a = I_a \left(1 + \frac{\Delta I_a}{I_a} \right) = I_a (1 + m_a)$$

因此,调幅波的峰值功率为:

$$P_m = \frac{1}{2} I_a^2 (1 + m_a)^2 R = (1 + m_a)^2 P_c$$

当 $m_a=1$ 时, $P_m=4P_c$,即峰值功率为载波功率的 4 倍。

(三) **电话功率** 我们对话筒讲话时,调幅波的振幅是变化的,输出的瞬时功率也是变化的,我们把调制音频变化一周的平均高频功率,叫做电话功率。显然,电话功率应该包括载波功率及上、下边频功率,即:

P_{av} =载波功率+上边频功率+下边频功率

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} I_c^2 R + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} m_a I_c \right)^2 R + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} m_a I_c \right)^2 R \\ &= P_c + \frac{m_a^2}{4} P_c + \frac{m_a^2}{4} P_c \\ &= \left(1 + \frac{m_a^2}{2} \right) P_c \end{aligned}$$

式中, $\frac{1}{2} m_a I_c$ 是边频电流的振幅。

可见,发话时,发射机输出功率增加了上、下边频功率成分。当 $m_a=1$ 时, $P_{av}=1.5P_c$ 。例如,某调幅发射机的载波输出功率为 100 瓦,满调幅时,输出的总功率即电话功率为 150 瓦。

前面说过,人们发话时的实际平均调幅度约为 30%左右,即 $m_a=0.3$,代入电话功率算式中,得出:

$$P_{av} = \left(1 + \frac{m_a^2}{2} \right) P_c = \left(1 + \frac{(0.3)^2}{2} \right) P_c = 1.045 P_c$$

即实际发话时,增加的边频功率是很小的, $P_{av} \approx P_c$,因而我们可以把发射机的载波功率来代表发射机的电话功率。在发射机的技术性能中,输出功率就是指输出的载波功率。

五、调幅制通信的优缺点

从以上对振幅调制的分析中可以看出, 这种调制方式有以下优缺点:

(一)由于输出载频及上、下边带, 在发射机方面, 对滤波要求比较简单; 在接收机方面, 易于解调; 而且对发、收信机的频率稳定度的要求也可以较低。电台结构较简单, 成本低, 便于普及。因而广播和早期的短波通信, 几乎都是采用调幅制。

(二)频谱利用不经济。调幅波的上、下两个边带, 每个边带都完整地“记载”着信息, 让两个边带都发射出去, 使信号带宽增大了一倍, 对宝贵的频率资源是个浪费, 这是应该而且可以避免的。

(三)功率利用率低。调幅波的载频不“记载”信息, 但占有输出功率的绝大部分, 而“记载”信息的边频功率则占的比重很小。同时对发射管来讲, 由于调幅波的最大功率状态只能等于发射管的额定功率, 因而发射机的输出功率即其载波功率只能达到发射管额定功率的 $1/4$ 。也就是说一个本来可以输出 100 瓦的发射管, 用作调幅时, 只能输出 25 瓦。所以, 对发射管的功率利用率低, 而发射管及其供电、散热装置, 在发射机内占有很大的位置。

(四)抗干扰性能差。由于调幅制通信是利用调幅波的振幅变化来传送信息, 调幅度又不能大于 1, 平均调幅度很低, 而在传播和接收过程中, 由于干扰和噪声所引起的寄生调幅, 调幅接收机对此又无法消除, 因而使得接收机的信号噪声输出比降低。

§ 3—3 单边带调制

一、单边带信号的产生

既然振幅调制所产生的上、下两个边带, 都同样地“记载”信息, 因而我们可以只发送一个边带, 将另一个边带及不“记载”信息的载频抑制掉。这种调制方式称为单边带调制。这样传送信息的方式, 则称为单边带(SSB)通信。

产生单边带信号的方法很多, 最常用的方法为滤波法, 如图 3—9 所示。将音频调制信号和一个频率较低的载频信号同时送入环形调制器, 输出为载频被抑制的上下两个边带, 然后通过边带滤波器, 滤除其中一个边带, 就可以得到单边带信号输出。

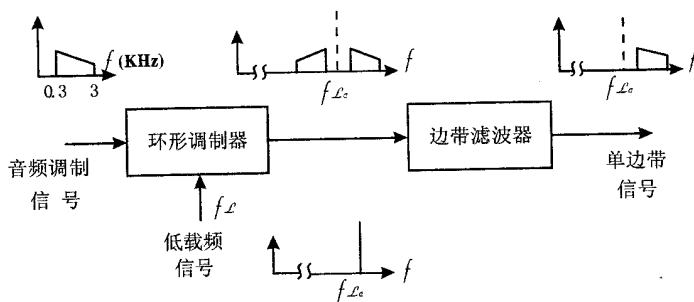


图 3—9 单边带信号的产生

环形调制器是由四个二极管组成的平衡调制电路, 由于其电路结构特点, 使得单独音频输入或单独载频输入时, 调制器均无输出, 只有当音频调制信号和载频同时输入时, 才输出上下边带, 而没有载频输出, 所以图中的载频用虚线表示, 这为滤波带来了方便。

在单边带信号的产生电路中, 采用低载频调制(例如 100KHz), 这有利于滤波器制作。因为两个边带频率相差的绝对值仅几千赫, 如果载频的频率很高, 则两边带频率相差的相对量很小, 滤波器要通过一个, 完

全抑制一个就很困难了。当然，在低载频上产生的单边带信号，还要经过一次或多次频率搬移，把信号搬到所要求的工作载频上，才进行发射。

由于单边带调制只需要占用一个边带，我们可以把省出来的另一个边带的频谱用来传送另一路话或传送多路报，这样，可以达到多路复用的目的。如图 3-10，两路话分别送入各自的环形调制器，一路取上边带输出，一路取下边带输出，两路合成为没有载波输出的两个单边带信号，但这两个边带不是象调幅那样，只传送同一路话，而是传送两路话或一路话多路报。

二、单边带发射机的组成

单边带发射机一般由信号产生部分、频率搬移部分、功率放大部分、频率合成器及电源等部分组成。图 3-11 是表示发送一路单边带话的发射机方框图。

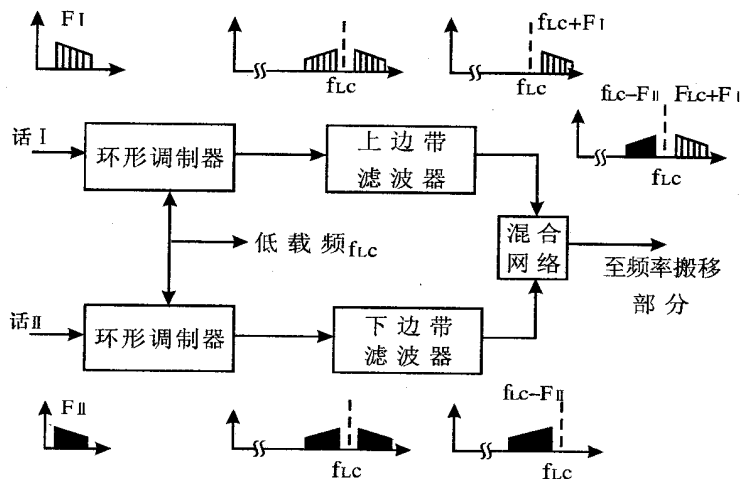


图 3-10 两路单边带话的产生方框图

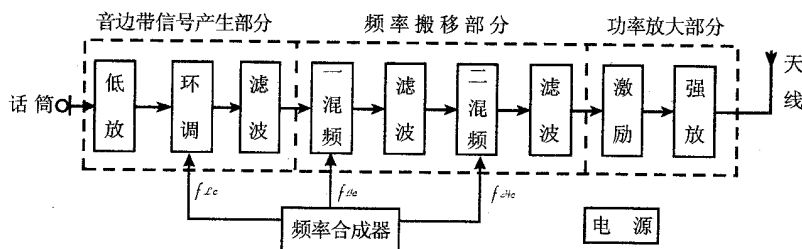


图 3-11 单边带发射机方框图

话音信号经低放级放大后，送入环形调制器，同时由频率合成器输出的代载频 f_{LC} 也送入环形调制器，输出载频受到抑制的上下两个边带，经滤波器滤除一个边带，例如输出上边带。设话音频带为 $0.3 \sim 3\text{KHz}$ ，低载频 f_{LC} 为 100KHz ，则输出的上边带为 $100.3 \sim 103\text{KHz}$ 。频率搬移部分的两个混频器，也是能抑制载频输出的环形调制器或平衡调制器。在低载频上产生的单边带信号送入第一混频器，同频率合成器输出的中载频 f_{IC} 进行混频，经滤波器抑制其它成分，只输出它们的和频(也可以只取它们的差频)。设中载频 f_{IC} 为 1000KHz ，则它们的和频为 $1100.3 \sim 1103\text{KHz}$ 的边带信号。然后根据所需要的工作频率，调整频率合成器输出的高载频 f_{HC} ，设要求工作频率为 5MHz ，则频率合成器的 f_{HC} 为 3900KHz ，在第二混频器混频后，通过滤波器再取它们的和频，输出 $5000.3 \sim 5003\text{KHz}$ 的上边带信号。这样，经过多次频率搬移，就把话音频谱搬到发射机的工作

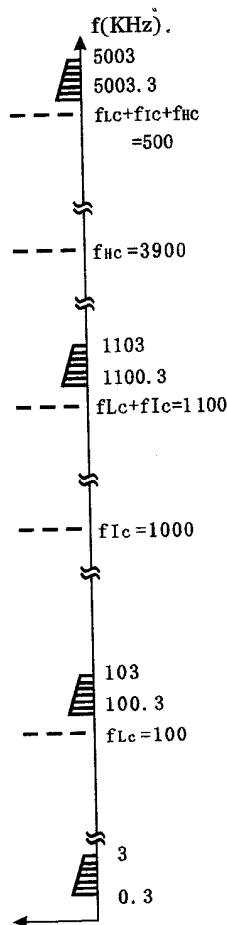


图 3—12

频率上了。如图 3—12，图中虚线所示的载频频率是被抑制而不输出的，但是，我们说发射机的工作频率时，却是指发射信号的载频频率。如在本例中，我们说发射机的工作频率是 5MHz 即 5000KHz，实际上它发送上边带信号时，输出的信号频率是 5000.3~5003KHz，输出信号频率中并没有 5000KHz。

三、单边带通信的优缺点

(一)节约频带 单边带信号只占有调幅时的一个边带，如果最高调制音频为 F_m ，则调幅信号的带宽为 $2F_m$ ，单边带信号的带宽则为 F_m ，即节约了一半频带。这样，在一定的频段内，可同时工作的电台数目就可增加一倍，显然，这有利于缓解频带拥挤的问题。

(二)节省功率 调幅通信时，发射机要发射载频和两个边带的功率，而单边带通信则把功率集中在一个边带上发射。显然，要达到同样的接收效果，单边带发射机的功率可以节省许多。反之，若发射同等的功率，则单边带通信可以增大通信距离，改善接收效果。

(三)抗干扰性能好 由于信号频带压缩，接收机的通频带也可相应减小一半，因而干扰和噪声的输入也相应减小一半，有利于提高信号噪声比。

(四)受电波传播的影响小 调幅通信和单边带通信通常是用于短波频段，在第六章中我们将要讨论，短波通信主要是靠电离层反射进行的，在电波传播过程中存在着多径效应，以及由此而引起的衰落现象，特别是频率选择性衰落，即信号中不同频率分量衰落特性是不同的，这会使接收到的信号产生失真，例如，载频衰减较大，边频衰减较小，则可能产生过调幅而导致失真。单边带通信因不发射载频，因而受这种传播影响小。

(五)便于多路复用 单边带通信可利用节省的单边带发射时的频率搬移一个边带传送另一路话或多路报，以增加通信容量，使一部电台进行多路通信。

(六)对收、发信机的技术要求高 特别是对收发信机的频率稳定度、滤波器的性能以及对发射机中放大器的线性（即要求放大器能进行不失真的放大）要求比较高，收、发信载频误差的绝对值不得超过 80~100 赫。这些使得设备结构复杂，成本提高。

和调幅制通信相比，单边带通信的优点是非常突出的，上述技术上的要求，现在已不成为问题，因而在短波通信中，单边带通信已基本取代调幅通信而成为一种主要的通信方式，但是，单边带通信要求收发频率误差的绝对值不能超过 80~100 赫，这对于工作频率更高的甚高频或特高频电台来说，则是难以达到的。例如工作频率为 500MHz，即使频率稳定度达到 10^{-6} （关于频率稳定度的定义及换算方法将在本章后面讲），也可能产生 500Hz 的频率误差或漂移，要求再进一步提高频率稳定度会有很多困难，特别是对于小型移动通信设备来说更是如此。因而在这些场合，将采用另一种调制方式即调频来进行通信。

§ 3—4 频率调制

一、调频及调频波

(一)调频与调频指数 调频就是用音频调制信号去控制高频振荡的频率，使其频率随调制信号的瞬时值而变化。图 3—13，a 为音频调制信号，b 为调制前的高频即载频电压，c 为调制后的调频波，d 为调频波的频率变化曲线，即调频波的频率是围绕着中心频率 f_0 而正负偏移。

调频波频率偏移的最大值, 即图 3-13d 中的 Δf_m , 称为最大频偏, 简称频偏。最大频偏与调制信号的振幅成正比, 而与调制音频的频率无关。即 $\Delta f_m = KU\Omega$, K 是由调制电路决定的一个常数, K 值愈大, 说明以较小的音频调制电压, 可以得到较大的频偏, 即调制灵敏度高。下面我们还要讨论, 由于最大频偏与调频波的带宽有关, 为了限制调频波的带宽, 对调频时的最大频偏, 也不得有所限制。在通信中, 最大频偏一般为 $\pm 5\text{KHz}$, 而调频广播中最大频偏为 $\pm 75\text{KHz}$ 或者更大一些。

调频波的最大频偏 Δf_m 与调制音频频率 F 之比, 叫做调频指数, 以 m_f 表示, 即:

$$m_f = \frac{\Delta f_m}{F} = \frac{KU\Omega}{F}$$

也就是说, 调频指数与最大频偏成正比, 与调制音频的频率成反比。

调频指数又叫调频系数, 它和调幅度 (调幅系数) 有着相似的意义, 都是用来表示调制深浅的。所不同的是, 调幅度不能大于 1, 而调频指数可以小于 1, 也可以大于 1。例如, 在调频通信中, 一般规定最大频偏为 5KHz , 最高调制音频为 3KHz , 则调频指数

$$m_f = \frac{\Delta f_m}{F} \approx \frac{5}{3} = 1.67$$

而调频广播的调频指数则远大于 1, 例如, 最大频偏为 75KHz , 最高调制音频为 15KHz , 则 $m_f = 5$ 。

(二) 调频波的频谱 调频波的频率或者说它的角频率 ω 是随音频调制信号变化的, 设音频调制电压为

$$u_\Omega = U_\Omega \cos \Omega t$$

则调频波的角频率为

$$\omega = \omega_0 + \Delta \omega_m \cos \Omega t$$

上式中, ω_0 为调制前的载频角频率, 也就是调频波的中心角频率, $\Delta \omega_m$ 为调频波角频率变化的最大值, 即 $\Delta \omega_m = 2\pi \Delta f_m$ 。

频率变化, 必然伴随着相角变化, 经过一定的数学换算后, 调频波的电压表示式为:

$$\begin{aligned} u &= U_c \cos \left[\omega_0 t + \frac{\Delta \omega_m}{\Omega} \sin \Omega t \right] \\ &= U_c \cos \left[\omega_0 t + m_f \sin \Omega t \right] \end{aligned}$$

要将上式展开, 需要涉及许多数学知识, 我们仅将其结果写在下面, 即

$$\begin{aligned} u &= J_0(m_f) U_c \cos \omega_0 t \\ &+ J_1(m_f) U_c [\cos(\omega_0 + \Omega)t - \cos(\omega_0 - \Omega)t] \\ &+ J_2(m_f) U_c [\cos(\omega_0 + 2\Omega)t + \cos(\omega_0 - 2\Omega)t] \\ &+ J_3(m_f) U_c [\cos(\omega_0 + 3\Omega)t - \cos(\omega_0 - 3\Omega)t] \\ &+ J_4(m_f) U_c [\cos(\omega_0 + 4\Omega)t + \cos(\omega_0 - 4\Omega)t] + \dots \end{aligned}$$

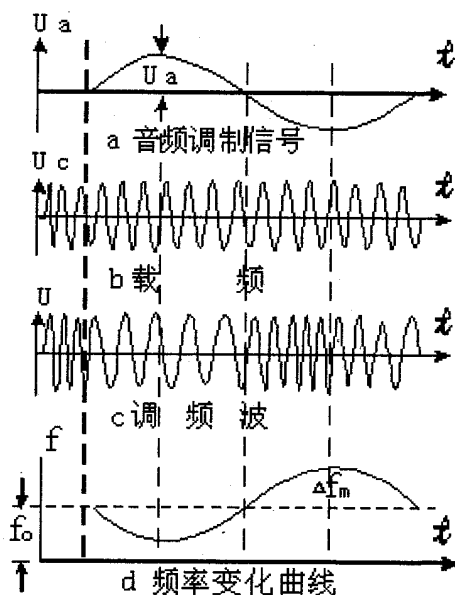


图 3-13 调频波

式中 $J_n(m_f)$ 式中是以 m_f 为自变量的贝塞尔函数。其值可根据调频指数 m_f 的大小由贝塞尔曲线查出。为方便起见，表 3—1 列出了 $J_n(m_f)$ 与 m_f 的对应关系，可供需要时查阅。表中是按载频振幅 $U_c=1$ 时各边频振幅的相对值写出。从表中还可以看出，调频后中心频率 ω_0 的振幅也是变化的，它不是原载频的振幅。

调频波的展开式说明，受单一音频调制的调频波，是以载频 ω_0 为中心具有无限对上下边频 $(\omega_0 \pm \Omega)$ 、 $(\omega_0 \pm 2\Omega)$ 、……的宽频带信号。边频的振幅有正有负，当 n 为奇数时，下边频的振幅是负的。由表 3—1 还可以看出，中心频率 ω_0 的振幅 $J_0(m_f) U_c$ 可以比边频振幅小。边频振幅的大小，与调频指数 m_f 有密切的关系，当 m_f 一定时，边频次数 n 接近 m_f 值后，其振幅迅速减小，当边频振幅减小到一定数值，例如 $0.15U_c$ 后，就可略而不计，这样就可以认为调频波是由有限对边频组成的。图 3—14 分别画出了 $m_f=2$ 和 $m_f=5$ 的频谱图，设调制音频都是 3kHz ，图中振幅是取相对值，小于载频振幅 15% 的边频没有画出。

(三) 调频波的带宽 调频波的带宽与调频指数 m_f 的大小有密切关系，同时与要保留的边频 下限值不同而不同。在一般无线电通信中，滤去振幅小于 15% 载频振幅的边频分量，不会影响通话质量。而在频分制多路通信中，为使信号失真最小，通常只滤去振幅小于 1% 的边频分量，显然，按这样的要求，调频波的带宽就会更大些。

表 3—1 $J_n(m_f)$ 与 m_f 的对应关系 (设 $U_c=1$)

$m_f \backslash J_n$	J_0	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	J_7	J_8	J_9	J_{10}	J_{11}	J_{12}
0.01	1.00	0.005											
0.20	0.99	0.10											
0.50	0.94	0.24	0.03										
1.00	0.77	0.44	0.11	0.02									
2.00	0.22	0.58	0.35	0.13	0.03								
3.00	0.26	0.34	0.49	0.31	0.13	0.04	0.01						
4.00	0.39	0.06	0.36	0.43	0.28	0.13	0.05	0.01					
5.00	0.18	0.33	0.05	0.36	0.39	0.26	0.13	0.05	0.02	0.01			
6.00	0.15	0.28	0.24	0.11	0.36	0.36	0.25	0.13	0.06	0.02	0.01	0.02	
7.00	0.30	0.005	0.30	0.17	0.16	0.35	0.34	0.23	0.13	0.06	0.02	0.01	0.003
8.00	0.17	0.23	0.11	0.29	0.11	0.19	0.33	0.32	0.22	0.13	0.06	0.03	0.01

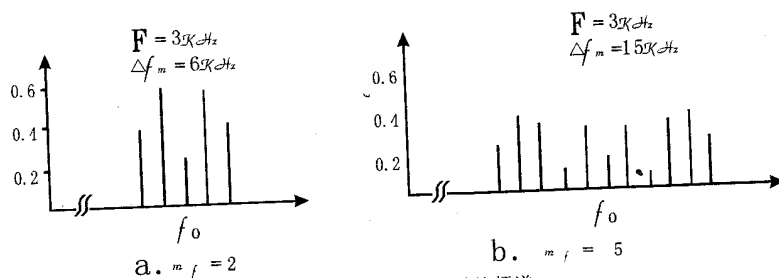


图 3—14 不同 m_f 时的频谱

一般计算调频波带宽的方法是这样的:

当 $m_f \leq 1$ 时, 只取一对边频, 即信号带宽 B 为: $B=2F_m$

即调频波的带宽和调幅波的带宽是一样的, 等于最高调制音频 F_m 的两倍, 我们称这种情况为窄带调频。

当 $m_f > 2$ 以后, 大于载频振幅 15% 的有效边频对数 n 大致与 m_f 相等, 因而

$$\begin{aligned} B &= 2n F_m = 2m_f F_m \\ &= 2 \frac{\Delta f_m}{F_m} \cdot F_m = 2 \Delta f_m \end{aligned}$$

也就是说, 当 m_f 比较大时, 调频波的带宽约等于其最大频偏的两倍, 我们称这种情况为宽带调频。

通常情况下, 调频波的带宽可按如下公式计算, 即

$$B=2F_m(1+m_f)=2(F_m+\Delta f_m)$$

例如, 在调频无线电话中, 最大频偏为 5KHz, 最高调制音频为 3KHz, 代入上式, 得出带宽为 16KHz。一些无线电的技术性能中, 写有发射型式或调制方式是“16F3”, 就是表示带宽为 16KHz, F 表示调频, 3 是一种代号, 表示是单信道的模拟信息。

二、调频发射机的组成

图 3—15 是调频发射机基本组成方框图。可以看出, 它的基本组成大部分和调幅发射机相同, 低放、振荡、缓冲、激励、强放以及没有画出来的许多滤波电路等, 其作用基本上是一样的, 下面只就调频发射机中的几个特殊的地方作些介绍。

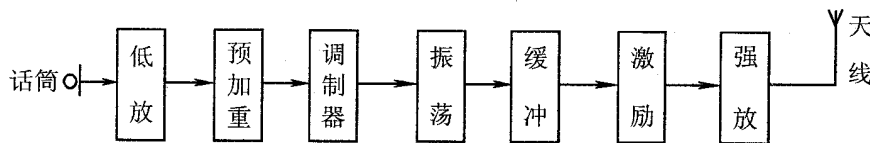


图 3—15 调频发射机方框图

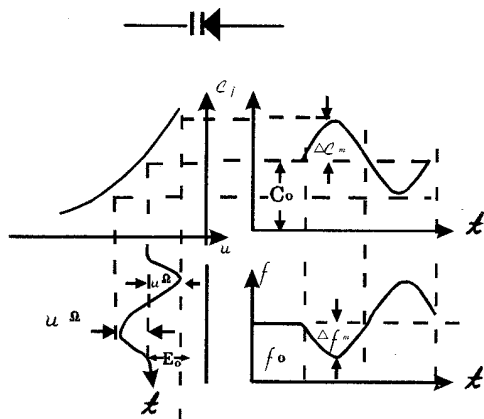


图 3—16 电容二极管调频原理

(一)变容二极管调频器 调频是要控制振荡的频率, 因而调频要在振荡级进行。振荡器的振荡频率是由振荡回路的电感和电容决定的, 也就是说, 要设法使振荡回路的电感或电容随音频调制电压变化, 才能达到调频的目的。在这方面, 变容二极管为我们提供了很好的调制元件。图 3—16 是变容二极管的电路符号及其调频原理示意图。变容二极管的结电容 C_j 随所加反向电压的大小而变化, 音频调制电压 U_a 与一反向直流电压 E_0 串

接在变容二极管的两端，当 U_o 向正方向变化时，反向电压减小， C_j 增大；当 U_o 向负方向变化时，反向电压增大， C_j 减小。根据振荡频率与振荡回路电容量的关系：

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

当容量增大时，振荡频率降低；容量减小时，振荡频率增高。这样，通过由变容二极管组成的调制电路，并接在振荡器的振荡回路上，就可以把音频调制电压的变化，转换为振荡频率的变化，从而达到了调频的目的。

(二) 预加重电路

由于调频制本身的特点，调频接收机输出的噪声电压在高频端较强，而在话音频谱中，高频分量能量较弱。针对这一情况，调频发射机设有预加重电路，适当压缩低音频分量，或者说相对提高高频分量，以提高平均调频指数。在接收端解调后，则设有去加重电路，适当衰减高频分量，以恢复话音频谱原来的能量关系，而且抑制了噪声输出，提高了信噪比。通过予加重及去加重措施，增强了调频信号的抗干扰能力。

图 3—17 是预加重及去加重电路的基本组成。我们知道电容器可以通过交流电，但对交流电呈现一定的阻力，叫做容抗，当电容器的容量一定时，容抗的大小和交流电的频率成反比。在预加重电路中，输入的音频电压 U_{a1} 中，低音频分量由于频率低，电容器呈现的容抗大，降压多，在电阻 R 两端得到的输出电压 U_o 就小了；而高频分量由于频率高，电容器呈现的容抗小，降压少，在电阻 R 两端得到的输出电压相对较大，也就是起到了衰减低音频分量、相对提高高频分量的作用。在去加重电路中，则与上述作用相反，由于电容器对低音频分量的容抗大，使得在电容器上的降压大，即输出电压相对大些；电容器对高频分量的容抗小，使得在电容器上的降压小，即输出电压相对小些，也就是起到了衰减高频分量的作用。

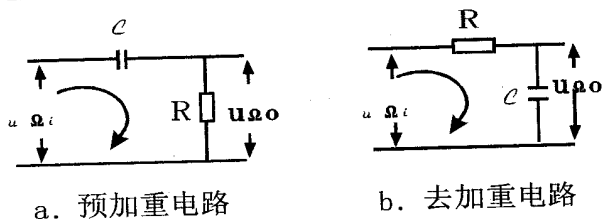


图 3—17

三、调频制通信的优缺点

(一) 抗干扰性能好

由于调频指数能大于 1，就可能使信号所产生的频偏远远大于干扰所产生的频偏，从而提高了信号与噪声的比值。抗干扰性能好，还在于在传播及接收过程中，由干扰所引起的寄生调幅，可以在接收机中用限幅器来消除，而调幅制通信则不能做到这一点。另外，前面讲过，在调频发、收信机中，采用预加重及去加重电路，也有利于抑制高频噪声，提高信噪比。

(二) 发射管的功率利用率高 由于调频波是等幅波，在调制过程中平均功率不变，等于载波功率，因而调频发射机可以始终工作在其发射管的最大功率状态。和调幅制相比，如果采用同样额定功率的发射管，则因调频制的功率利用率高，输出功率大。

(三) 调频波所占的频带较宽，只适于在频率范围较宽的甚高频以上频段工作 传送一路调频话比传送一路单边带话或调幅话所占的频带要宽得多，在短波段(3~30MHz)频率已很拥挤，不适于采用调频通信，而在频率范围较宽的甚高频(30~300MHz)及特高频(300~3000MHz)段，则完全适于采用调频通信。在城市调频广播中，则采用宽带调频，以传送高保真度的音乐节目。

§ 3—5 振幅键控与频率键控

前面介绍过的几种体制的发射机，除可用于发话外，也可以用于发报，即用手键或电传打字机拍发电码符号，控制高频振荡的某一参数，达到传送电报的目的。用电码符号来调制高频信号，称为键控。

常用的键控方式有两种：

一、振幅键控 (ASK)

用电键控制高频输出的有无，按键时，有高频输出；抬键时，无高频输出，即高频振幅为零，称为振幅键控。图 3—18 是适于用手键发送的一种非均匀电码，叫莫尔斯电码。它用点、划的不同组合来代表阿拉伯数字、英文字母及有关符号。图中的“·—”就代表英文字母 A，在收报机中发出“的、打”的声音。

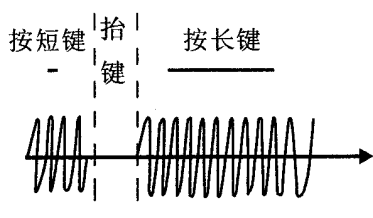


图 3—18 振幅键控

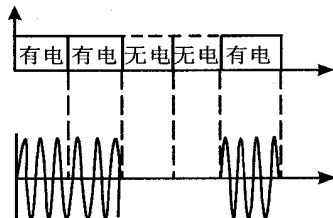


图 3—19 均匀电码

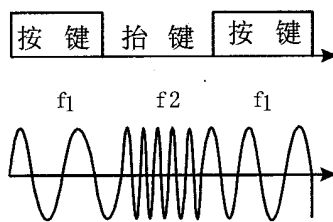


图 3—20 频率键控

用电机发送电报时，则采用均匀电码，它用时间相等的五单元有电(传号)、无电(空号)脉冲来组成各种电码符号(见图 3—19)。均匀电码，适用于机器传送。

二、频率键控 (FSK)

用电键控制发射机高频振荡的频率，如按键时输出 f_1 ，抬键时输出 f_2 。高频信号的振幅不变，只是频率随着电码符号的按键，抬键(即传号、空号)而改变，叫做频率键控。这种电报就称为移频电报(见图 3—20)。

采用频率键控具有以下优点：

(一)抗干扰性能好 无论是传号或空号，发射机的输出不变，使接收机的信号噪声比保持恒定，避免了在抬键时发射机无输出，接收机噪声增大，造成点划不清的缺点。用于印字报工作可靠，可减少错误动作。移频报也可以象调频波一样，在接收机中用限幅器消除干扰和噪声对信号的寄生调幅，进一步提高了信噪比。

(二)便于进行多路通信 多路移频报同时工作时，只要它们的频率各不相同，且都在音频范围内，便可将多路报置于一个话音频带内，作为一路话发射出去。接收机只要将各组频率区分开来，就可还原成电报信号，实现多路通报。例如 17 路载报，就是在 300~3400Hz 的话音频带内，安排了 17 路报，每路报占有传号和空号两个频率，17 路报共 34 个频率，各频率间隔为 90Hz。用这种方法通信，对发、收信机的频率稳定度、准确度及滤波器的技术要求比较高，只适于固定的通信台站使用

通常在一个话路中，传送两路移频报则比较简单些。如表 3—2，两路报同时工作时，可能有四种状态：I、II 路都抬键；I 路抬键，II 路按键；I 路按键，II 路抬键；I、II 路都按键。

表 3—2 两路移频报的频率组合

状态 路数	频率	f_A	f_B	f_C	f_D
I 路		无 电	无 电	有 电	有 电
II 路		无 电	有 电	无 电	有 电

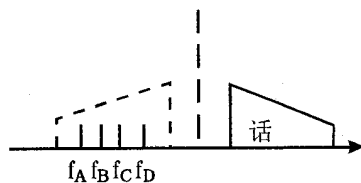


图 3—21 一话两报的频谱

因而可以用四个频率，来代表这四种状态。这四个频率，保持一定的频率间隔，经调制后占据一个话路频带，如图 3—21，就是在一般的单边带电台中，传送一路话两路报的频谱图。接收机收到这载有两路移频报的边带信号后，经过滤波及译码电路，分别对四个频率作出响应。如收到 f_B ，则给 I 路印字电报机发无电信号，给 II 路印字电报机发有电信号；收到 f_D ，则给两路均发有电信号。

§ 3—6 频率合成器

无论是发射机或接收机，都少不了振荡器，要求振荡器能提供的频率既稳定又数值准确，而且能在设置的频率范围内，以较小的频率间隔作连续调整的一系列标准频率信号。也就是说，对频率稳定度、准确度和分解度提出了很高的要求。

频率稳定度是指由于温度或其它因素变化引起频率变化或漂移的程度。常以 10 的负多少次方来表示其稳定度，如 2×10^{-6} ，表示其变化为百万分之 2 (2ppm)。频率准确度是指实际频率与标称频率误差的相对大小，也是以 10 的负多少次方来表示其准确度。显然，频率不稳不准，会降低通信质量，增加工作困难，甚至无法沟通联络。频率分解度是指可以按多细的频率间隔进行频率调整，一般小型移动电台要求每隔 5KHZ 能提供一个频率点。

对于上述要求，通常由电感、电容及晶体管组成的振荡器，是难以满足的。用晶体振荡器，可以得到较高的频率稳定度，但改变频率比较麻烦。解决这个问题的办法，就是采用频率合成技术，也就是用一块或几块晶体，采用综合或合成的手段，以获得大量稳定而准确的频率，满足发、收信机各部分的需要。

频率合成器的种类很多，目前应用最多的是数字锁相环频率合成器，图 3—22 是这种频率合成器的组成方框图，下面我们说明其工作过程。

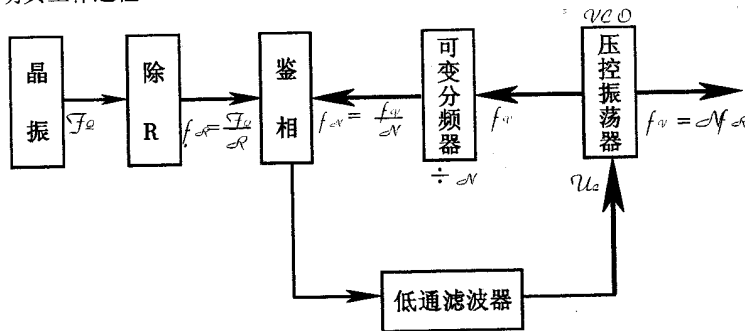


图 3—22 锁相环 (PLL) 频率合成器

晶体振荡器产生的振荡频率 f_Q 经除 R 电路，输出频率 f_N ，和晶振具有同样的频率稳定度和准确度，作为比较用的标准频率。压控振荡器 VCO 是受电压控制的可变频率振荡器，它只有一般的频率稳定度，振荡频率 f_V ，可在一定的范围内调整。

可变分频器的分频比 N 可在一定范围内改变。设计时，使 f_V 除以 N 后，即 f_N 大体和 f_N 相等。 f_N 与 f_N 同时送入鉴相器，进行相位比较，如两者频率相同，则鉴相器没有输出，经低通滤波器输出的控制电压 U_C 为 0，VCO 的频率不变，说明此时输出的 $f_V = N f_N$ 与晶振频率具有同样的频率稳定度和准确度。VCO 的频率不稳不准，则经分频后 f_N 与 f_N 不等，经鉴相后有输出，经低通滤波器输出正的或负的控制电压，使 VCO 的频率相应降低或增高，直到 f_N 与 f_N 接近相等，环路才能锁定。所以，这种合成器是以晶振频率为标准，来调整和锁定压控振荡器的频率，使其具有和晶振相等的频率稳定度和准确度。

下面, 我们举一个例子来具体说明频率合成过程。设发射机要求的频率范围为 $150 \sim 153.990\text{MHz}$, 要求每隔 10kHz 有一个频率点, 即能提供 400 个频率点。设晶振频率为 1MHz , R 为 100, 即 $f_R = 10\text{kHz}$ 。 f_R 决定了频率的最小间隔 ΔF , 要求频率分解度愈细, 则 f_R 应愈小。压控振荡器的频率范围为 $150.000 \sim 153.990\text{MHz}$,

$$N_{\text{Max}} = \frac{f_{\text{v max}}}{\Delta F} = \frac{153990}{10} = 15399$$

最小分频比为:

$$N_{\text{Min}} = \frac{f_{\text{v min}}}{\Delta F} = \frac{150000}{10} = 15000$$

可变分频器的最高分频比为:

当我们用频率调整机件, 调整 VCO 的频率时, 也相应改变了可变分频器的分频比, 使 f_n 基本上和 f_R 相等或接近, 然后通过鉴相、滤波, 对 f_v 进行调整, 使 $f_v = Nf_R$ 完成锁相的作用。

§ 3—7 发射机的主要技术特性

一、载波输出功率

载波输出功率是指发射机无调制时的输出功率。采用调频或调相制的发射机, 其输出功率不因有无调制而变化。采用调幅制的发射机, 在发话时要增加上、下边带功率, 但因通常平均调幅度很低, 边带功率占的比重很小, 仍然可以用载波输出功率代表发射机的输出功率。

载波输出功率是决定通信距离的重要因素。选定发射机的功率等级应和要求覆盖的服务范围相适应。盲目地增大输出功率不仅会造成浪费和造成对环境的污染, 而且会影响系统的干扰。

一般袖珍式对讲机的载波输出功率在 0.5 瓦以下, 手持机为 1—5 瓦, 固定或车载式无线电话机为 5—25 瓦

二、频率稳定度

频率稳定度通常是用相对频率稳定度来表示。即在一定的时间间隔内, 由于温度等环境条件在规定的范围内变化时, 发射机载波频率的漂移量与标定载波频率的比值。即

$$\text{频率稳定度} = \frac{\text{载波频率漂移量}}{\text{标定载波频率}}$$

例如, 某发射机的标定载波频率为 50 兆赫, 在 $-20^\circ \sim +60^\circ\text{C}$ 范围内, 一日内最大频率漂移量为 ± 100 赫, 则其频率稳定度为:

$$\frac{(150.0075 - 150) \times 10^6}{150 \times 10^6} = \frac{7500}{150 \times 10^6} = 50 \times 10^{-6}$$

上述频率稳定度也可以书写为 ± 0.000002 或 $\pm 2\text{ppm}$ 。显然, 这个数值的绝对值愈小, 则频率稳定度愈高。一般用电感、电容等分立元件组成的振荡器, 其频率稳定度只能达到 10^{-4} 数量级; 用晶体振荡器作为标准频率源的频率合成器, 其频率稳定度可以达到 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 数量级, 甚至更高。

三、频率偏差

在无线电发射设备的技术规定中, 常常使用频率偏差容许限度一词, 来衡量发射频率的准确度。它是指实际测试的发射频率与指配频率(即标定频率)间的最大容许偏差, 以百万分之几或偏差的绝对值多少赫来表示。

例如, 某发射机在某信道工作, 该信道指配的频率是 150MHz , 由于频率不准不稳等原因产生频率偏差, 实际测试的频率是 150.0075MHz , 则其频率偏差为

$$\frac{(150.0075 - 150) \times 10^6}{150 \times 10^6} = \frac{7500}{150 \times 10^6} = 50 \times 10^{-6}$$

对于不同频段、不同功率,不同用途的电台,对频率偏差容许限度规定了不同的要求,对于工作在 108~407MHz 频段的移动电台,容许限度规定值为 50×10^{-6} ;对于工作在 470~2450MHz 频段的移动电台,容许值为 300×10^{-6} 。对功率较大的固定台,则要求愈高,即容许值愈小。例如,对于中波广播电台,规定频率偏差的容许值为 10Hz。

频率的稳定及准确与否,对通信的可靠性有很大的影响。频率偏差大,则可能使对方接收机在指定的信道上收不到信号;频率稳定度差,则会使对方在接收信号时,忽强忽弱,收听困难,甚至使通信中断。频率不准不稳,还会增加对邻道的干扰。随着空间电波的日益拥挤,信道间隔的不断缩小,对频率稳定度与准确度的要求愈来愈高。

四、邻道功率

邻道功率是指发射机在规定的调制状态下工作时,其输出落入相邻信道带内的功率。它通常用邻道功率与发射机载波输出功率的比来表示。

一般规定,当信道间隔为 25KHz 时,带宽为 16KHz 的调频发射机,其邻道功率应小于负 60 分 dB。也就是说,设发射机的载波输出功率为 1W,则其邻道功率不应超过 $1 \mu W$,即

$$10 \log \frac{\text{邻道功率}}{\text{载波功率}} = 10 \log 1 \times 10^{-6} = -60 \text{ 分贝}$$

邻道功率愈大,对工作在相邻信道的接收机干扰愈严重,所以要严格加以限制。

五、残波辐射功率

残波辐射系指除基波辐射以外的谐波辐射、寄生辐射和相互调制产生的任何残波辐射功率。无线电发射设备技术规定中所指的残波辐射功率容许限度,是指加到天线馈线上的任何残波辐射的平均功率容许值,或从该设备的任何部分发出的杂散发射。通常用 mW、 μW 表示,或用 dB 表示残波辐射功率比基波平均功率的衰减量。即

$$10 \log \frac{\text{残波辐射功率}}{\text{基波平均功率}} (\text{dB})$$

残波辐射能在离工作频率很远的频道上干扰其它接收机的正常工作,特别是对于功率较大的发射台,更要严格控制其残波辐射功率。通常规定,工作在 30~960MHz 频段的发射机,功率在 25W 以上者,限定为 -60dB;功率在 25W 以下者,限定为 -40dB。

六、发射标识

发射标识用以标明发射信号的频带宽度和工作方式,又称为发射型式或发射类别。标识由若干个字符组成,下面列举几个常用的发射标识及其所标明的内容。

6K00A3E 标明带宽为 6KHz 的调幅双边带单路话。

16K00F3E 标明带宽为 16KHz 的调频单路话,此项发射标识习惯上常简写为 16F3,

3K00J3E 标明带宽为 3KHz 的单边带抑制载波的单路话。

6M25C3F 标明带宽为 6.25MHz 的电视图象

发射标识的字符规定不得超过 9 个。前 4 位数字及字母,表示带宽: H 代表赫(Hz), K 代表千赫(KHz), M 代表兆赫(MHz), G 代表吉赫(GHz)。单位后面的数字表示小数点后的数,如 6M25 就是 6.25MHz。第 5 位字符是字母,表示调制方式: A 代表调幅双边带, F 代表调频, J 代表单边带, N 代表未调制的载波发射。第 6 位字符是数字,表示主载波信号性质: 2 代表数字信息的单信道, 3 代表模拟信息的单信道, 0 代表无调制信号。第 7 位字符是字母,代表发送的信息类型: A 代表人工报, B 代表自动电报, C 代表传真, D 代表数据, E 代

表电话, F 代表电视等。

有些调频无线电话机在发射标识上同时写有 F2D 和 F3E, 标明该电台在呼叫时采用数字信令, 通话时则采用模拟调频话。

发射信号的带宽是指占总辐射能量 99% 的频带宽度, 即信号频谱处于此带宽以外的部份只能占总能量的 1%, 而且高于带宽上限和低于带宽下限的部份各占一半。图 3—23 显示发射机的辐射带宽与信道间隔的关系。通常规定超短波调频电话机的带宽为 16KHz, 信道间隔为 25KHz, 发射机的辐射带宽愈宽, 则可能造成的邻道干扰愈严重。

七、发射机互调

当一个发射机的输出端耦合了来自其它发射机的信号时, 由于其末级功放的非线性作用而产生信号的混频, 混频产物又辐射出去而干扰其它接收机。信道间隔愈小, 使用的信道愈多, 各发射机天线相距愈近, 或者共用天线而隔离达不到要求时。

则互调干扰愈为严重。

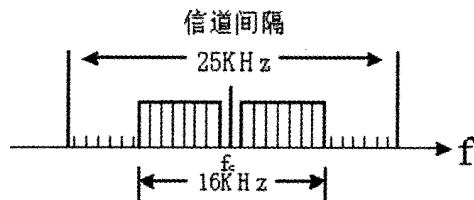


图3—23辐射带宽

八、调制特性

发射机的调制特性包括调制灵敏度, 调制频率特性和调制线性等项指标。

调制灵敏度 是指用 1000Hz 的音频调制信号进行调频, 达到最大允许调制度的 60%, 即频偏为 $\pm 3\text{KHz}$ 时所需要的音频电压值。调制灵敏度过低, 固然不好, 过高则易受外界干扰和噪声的影响, 并使幅射带宽加宽, 增加对邻道的干扰。

调制频率特性 即发射机的音频响应。对调频发射机来讲, 是指当调制信号的输入电平保持恒定时, 频偏与调制信号频率之间的关系。要求在 0.3~3KHz 有用频带内, 调制频率特性平直。也就是说, 在 0.3~3 千赫话音频谱范围内, 输入电平相同的各音频分量, 所引起的频偏应该相同, 或者变化量不超过规定值, 例如 3dB, 就是最小频偏不应小于最大频偏的 0.707 倍。调制频率特性的好坏, 决定调制时产生频率失真的程度。

调制线性 是指用规定的调制频率 (1000Hz) 进行调制时, 对调频机来讲, 已调波的频偏随调制信号的电平变化而变化的线性程度。理想的情况下, 两者成线性关系, 如图 3—24。否则, 调制特性弯曲, 如图中虚线所示, 就要产生失真。这种失真, 称为非线性失真。

一个非线性电路, 产生非线性失真的大小, 用非线性失真系数来表示。非线性失真系数用 K_f 表示, 它是这样定义的: 把一个正弦波输入非线性电路时, 它产生的各次谐波振幅的平方和的方根值与基波振幅之比, 即

$$K_f = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \times 100\%$$

一般移动电台, 要求非线性失真系数在 10% 以下就可以了。

发射机的各项技术指标以及接收机的各项技术指标, 对于不同程式不同用途的电台来说, 要求是不一样的。一般来说, 基地式、固定式电台要求高一些, 手持机、袖珍式电台则要求低一些。我国有关部门分别制定有具体标准, 可供选用时参考。

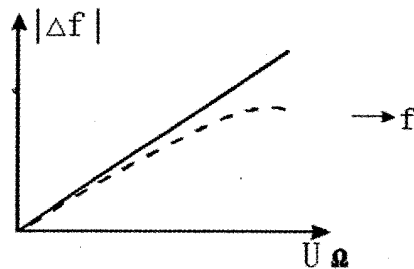


图3—24 调制线性

(未完待续)

本篇文章由 BA1BA 刘淳校对, 特此致谢

无线电通信基本原理

编者按：本教材是北京市无线电管理委员会（现北京市无线电管理局）在 1988 年编印的。全部内容共分八章，简明扼要、深入浅出地阐述了无线电通信的概念、电磁波基本知识、收发信机的组成，电波传播以及干扰等无线电基础知识，曾被北京市无线电管理委员会作为培训北京市各机关、企、事业单位通信管理人员的专用教材。《业余无线电台》将陆续刊登该教材的部分内容，供广大无线电爱好者自学、参考。（接上期，连载三）

第四章 接收机

§ 4—1 接收设备与接收机的组成

一、接收设备的组成及任务

同无线电发送设备一样，一套完整的无线电接收设备应包括：接收天线、接收机，电源及末端设备等部分。小型移动电台的接收天线通常是同发射机共用的，通过收发开关（PTT 键）转换或者通过天线双工器共用一副天线。接收设备的电源消耗一般比发送设备小，也多是收发共用的。接收末端设备，对于无线电话机来说，则是耳机或扬声器。

接收设备的任务是发送设备的逆变换。即由接收天线把空间的电磁波转换为高频感应电势，接收机经过选择和放大，把所需要的高频信号解调为音频信号，末端设备则将音频信号转换为声音。

二、接收机的基本功能

接收机是接收设备的主体，要完成接收任务，它必须进行以下几项工作：

一是选择，就是从接收天线输入的许多高频信号中，选取所需要的信号。为此，接收机中设有许多选频滤波装置，选取所需信号，抑制所需信号频带以外的各种干扰和噪声输出。

二是放大，就是将输入的微弱信号进行充分放大，以保证解调时的必要输入电平，并给末端设备提供足够的音频电压和功率。为此，接收机在解调前后均设有多级放大器。例如，从天线输入的高频感应电势 E_A 为 1 微伏，天线等效输入电阻 R_A 是 50 欧姆，则由天线输入的信号功率 P_i 是：

$$P_i = \frac{(E_A)^2}{R_A} = \frac{(10^{-6})^2}{50} = \frac{10^{-12}}{50} = 2 \times 10^{-14} \text{W}$$

即输入的高频信号功率仅 0.02 微微瓦。设要求末端音频功率输出 P_o 为 2 瓦，则接收机的功率总增益（即用分贝表示的功率放大量）是：

$$10 \lg \frac{P_o}{P_i} = 10 \lg \frac{2}{2 \times 10^{-14}} = 140 \text{dB}$$

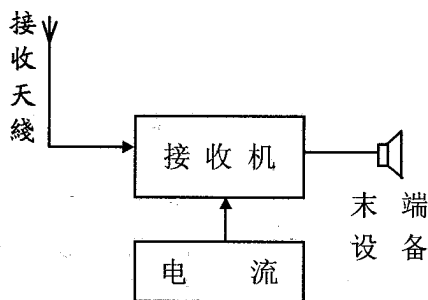


图 4-1 接收设备的组成

三是解调，就是从已调高频信号中恢复原先调制的音频信号。

以上三项，是接收机必须具有的最基本功能，所以各种接收机都少不了选择、放大及解调装置。实际上，接收机的组成要比上述复杂得多，其中最主要的是为了有利于对所需信号的选择和放大，在解调前，加有一级或多级变频装置，把信号载频逐次降低。此外，还有许多附加电路，用以抑制干扰和噪声输出，稳定工作频率，自动调整增益，以确保良好的接收效果。

三、接收机的组成及各级作用

为了对接收机建立一个初步的整体概念，我们用一个较典型的两级超外差式调频接收机方框图（见图 4—2），来说明接收机的组成及各级作用。为了使方框图简单一些，图中没有将各级的滤波电路显示出来，还有许多附加电路也未显示。

（一）输入电路 就是由接收天线输出端到接收机第一级输入端之间的电路，实际上是一个选频滤波和阻抗变换电路，其作用有二：一是选取所需信号，初步抑制干扰；二是使天线的等效电阻与高放的输入电阻匹配。

（二）高放 其作用是将天线输入的微弱高频信号电压进行放大，以提高整机的信号噪声比。因为接收机在混频电路中产生的噪声较大，在混频前先对信号进行初步放大，使信号能压倒噪声，提高了信噪比，有利于提高整机的灵敏度（关于灵敏度的确切定义，后面要专门讨论，这里可简单理解为接收微弱信号的能力）。高放级通常也是选频放大器，即其负载是有选频、滤波作用的谐振电路组成，因而又可增强接收机的选择性。

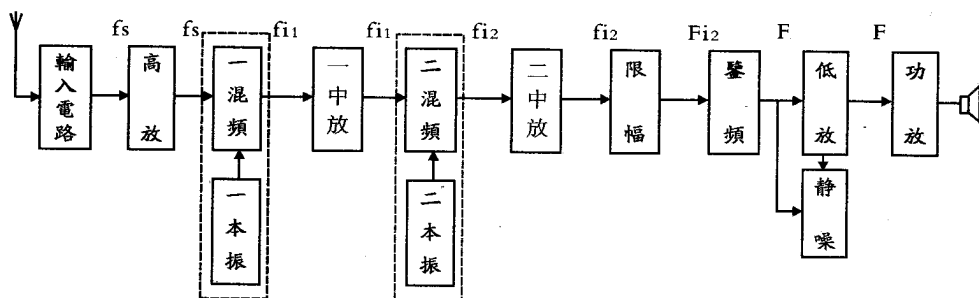


图4—2 调频接收机方框图

（三）一混频 其作用是把由高放级输出的高频信号 U_s ，和由一本振输出的等幅振荡电压 U_{L1} ，在本电路产生混频，由混频器的负载——带通滤波器选取它们的差频，即第一中频 $f_{i1} = f_{L1} - f_s$ ，从而把高频信号的载频降低，变为频率固定的第一中频信号输出。在超短波电台中，第一中频通常选定为 21.8MHz。

通常把混频器、本机振荡器及滤波器合称为变频器，如图 4—3 所示。变频时，利用一个独立的振荡器产生的振荡电压与信号进行混频，以选取它们的差频，叫做外差。差出的频率仍然较高，属于超音频，所以叫做超外差。接收机如果设有两级混频电路，就称为两次变频（混频）式或两级超外差式接收机。

（四）一中放 对第一中频信号电压进行放大。

（五）二混频 把第一中频信号的载频再次降低，变为频率较低的第二中频信号输出，一般接收机的第二中频选定为 455KHz。

（六）二中放 对第二中频信号电压进行放大。二中放通常设有 2~3 级。中放级由于工作频率较低，而且信号载频是固定的，因而工作稳定，增益高，滤波器的特性好，选择性好，它是决定接收机灵敏度及邻道选择性的主要部位。

（七）限幅 信号在发射、传播与接收过程中，由于干扰及噪声会产生对信号振幅与频率的寄生调制，

限幅器则用以消除调频波的寄生调幅，以减轻干扰与噪声。

(八) 鉴频 将调频信号还原为原先调制的音频信号。

(九) 静噪 当接收机没有收到信号时，自动将低频放大器闭锁，使噪声不在末端器件出现，避免无信号时输出刺耳的噪声，当接收机收到信号时，静噪电路不起作用，低放级自动解除闭锁，信号通过低放而输出。

(十) 低放及功放 放大解调后的音频信号电压及功率，给末端器件提供足够的音频功率。

这里要说明几点：

1. 并不是所有的接收机都必须具有上述组成部分，一般收听广播用的收音机，大多不设高放级，而且常常只设一级变频电路。
2. 调幅收音机则不能设置限幅器，而且其解调装置不叫鉴频器，叫检波器。
3. 现代用于通信的调频接收机及单边带接收机，大多设有频率合成器，提供标准的频率源： $f_{L1} = f_s + f_{i1}$ 。

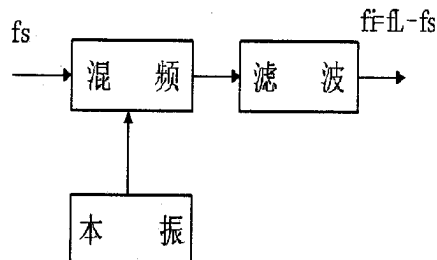


图4-3 变频器的组成

§ 4—2 接收机的频率搬移

一、接收机的频率搬移过程

无线电信号的接收过程，也是频率的变换过程，或者说是频率的搬移过程。如图4—4，已调高频信号的载频经过一次或多次向下搬移后，再通过解调，搬回到话音频带上。图4—4所示的是调幅波，对其它调制信号的频率搬移也是一样的。为讨论问题方便，假定接收的高频信号载频 f_s 为 150MHz，当接收的信号频率不同时，一本振的频率 f_{L1} 也随之变化，但总是保持比信号载频高(或低)一个固定的第一中频值，即： $f_{L1} = f_s + f_{i1}$ 。

本例中，设第一中频 F_1 为 21.8MHz，所以，当 $f_s = 150\text{MHz}$ 时， f_{L1} 为 171.8MHz。二本振的频率则是固定不变的，它总是等于两个中频值之和。本例中，设第二中频为 455KHz，即 0.455MHz，因而二本振的频率 f_{L2} 为： $f_{L2} = f_{i1} + f_{i2} = 22.255\text{MHz}$ 。

经过第二混频后，输出载频为 455KHz 的第二中频信号。调幅信号的解调，就频率变换来说，就是利用信号本身的载频与其边带信号在检波电路混频，得出其差频，即话音频带，从而完成了从高频已调信号到音频信号的频率变换。下面，我们着重讨论为什么在解调前要进行两次频率搬移，或者说两次变频。

二、为什么要进行频率搬移

为什么不把高频信号直接进行解调，而要先进行频率变换呢？这是从有利于对信号的放大和选择来设置的。

(一) 有利于提高放大器的稳定增益 放大器的工作频率愈高，愈容易产生寄生振荡，使放大器变成了振荡器，接收机出现叫声。当工作频率较高时，为了使放大器工作稳定，只好把放大量降低一些。如果把放大器的工作频率降低一些，就可以把放大器的放大量设计得高一些。放大器的放大量通常用分贝表示，叫做增益。接收机中的变频实际上就是降频，有利于提高中频放大器的稳定增益，从而有利于提高接收机的灵敏度。

(二) 有利于增强接收机的选择性 解调前的放大器都是设有选频滤波电路的频带放大器，要求能让信号

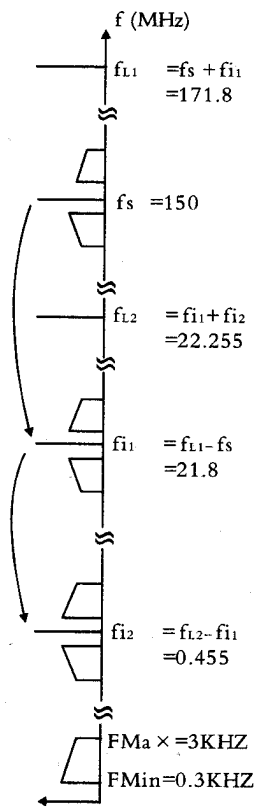


图4-4 接收机的频率搬移

频带通过,而对信号频带以外的各项干扰与噪声能有效地加以抑制。图4—5是一个简单的LC电路的谐振曲线,当放大器的工作频率与其负载——谐振电路的自然频率一致时,则电路发生谐振,输出电压最大,即放大器的放大量K最高,当工作频率偏离谐振电路的自然频率时,就发生失谐,输出电压减小,放大量降低。当放大器的放大量降低到谐振时放大量 K_0 的 $1/\sqrt{2}$,即0.707倍时,人的听觉不会有明显的感觉,我们把这一频带宽度称为放大器的通频带。

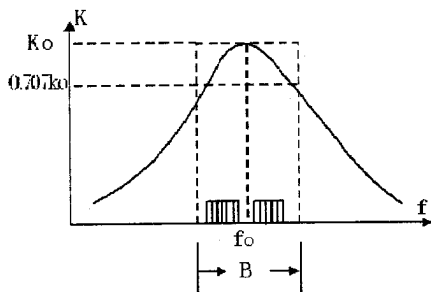


图4—5 简单LC电路的谐振曲线

由于高频信号本身是个频带信号,我们希望各放大器的通频带及接收机总的通频带应能保证信号频带以内的各频率分量,均能顺利通地过,而信号频带以外的各项干扰和噪声均能有效地加以抑制,即通频带以外的谐振曲线愈陡峭愈好,也就是说,理想的谐振曲线最好是个矩形,如图中虚线所示。虽然,理想的矩形曲线难以得到,但是降低放大器的工作频率,特别只是对频率固定的信号频带调谐,就可以采用较复杂的滤波电路,如初、次级均调谐的双调谐回路,晶体滤波器及集中选择滤波器等,使其谐振曲线近似矩形,既保证有必要的通频带,使信号频带以内的各边频分量能一视同仁地得到放大,又能对通频带以外的各种干扰有效地加以抑制。

根据数学分析,一个简单的单谐振电路的通频带B是:

$$B = \frac{f_0}{Q}$$

式中, f_0 是该电路的谐振频率, Q 是该电路的质量因素。即当电路的质量因素一定时,其通频带与其谐振频率成正比。例如,在高放级信号载频是150MHz,谐振电路的质量因素是50,则该级的通频带是:

$$B = \frac{f_0}{Q} = \frac{150}{50} = 3\text{MHz}$$

显然,如此宽的通频带,是无法抑制邻道干扰的,它只能对离信号载频较远的一些特殊干扰起抑制作用。但如果经过变频,把载频降低,例如降为500KHz,则同样上述电路,通频带就压缩为:

$$B = \frac{f_0}{Q} = \frac{500}{50} = 10\text{KHz}$$

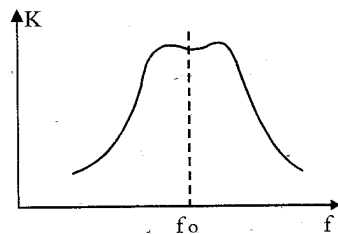


图4—6 双调谐电路的谐振曲线

显然,这样抑制邻道干扰的能力就大大增强了,而且,可以采用特别设计的滤波电路,使谐振曲线非常陡峭,而通频带又能满足信号频带的要求。例如,采用双调谐回路的谐振曲线(见图4—6),不仅可以得到两边陡峭。顶部平坦或出现双峰的近似矩形曲线,而且其通频带可以根据初次级耦合的松紧不同而变化,以适应不同的需要。变频前,不仅由于工作频率较高,而且又随所接收的信号频率变化,就很难实现上述要求。

总之,变频后,由于工作频率较低,且是对频率固定的中频信号(指载频而言)调谐,易于设计性能良好的滤波器,以增强选择性。中放级是接收机抑制邻道干扰的主要部位。

三、如何进行频率搬移

如图4—3,让高频信号电压和由本机振荡器提供的等幅振荡电压,同时送入混频电路,利用混频电路的非线性特性(即混频级的电流与其控制电压不是呈直线变化关系,如果从放大器的要求来说,则是产生了失真),在混频级的输出电路中,产生了许多新的频率分量,除信号频率 f_s ,本振频率 f_L 及其各次谐波外,还有它们的组合频率,即 $mf_L \pm nf_s$ 。通常,设计时使本振频率 f_L 高于信号频率 f_s 一个固定的中频值 f_i (当

然,也可以设计为 f_S 高于 f_L 一个中频),我们只是对它们的差频即中频 $f_i=f_L-f_S$ 感兴趣,混频器的负载——带通滤波器设计在对中频 f_i 谐振,因而,只有以中频 f_i 为载频的信号频带得以通过,其它各种不需要的频率分量,包括信号频率及本振频率的基频、谐波及它们的和频,它们各次谐波的组合频率等,都因为远离滤波器的通频带而被抑制。

本振频率通常由频率合成器提供,并保持与接收的信号频率同步变化,而始终高于(也有的机器是低于)信号频率一个固定的中频。如某接收机的频率范围是 $150.000\sim 153.991\text{MHz}$,第一中频为 21.8MHz ,则一本振的频率是 $171.800\sim 175.705\text{MHz}$ 。

四、为什么要进行两次频率搬移

由于变频是利用混频后取差频的方法进行的,这样,就带来了超外差机的一种特有干扰,叫镜像干扰。

所谓镜像干扰就是指高于信号频率两倍中频的干扰。如图4—7,设信号频率为 f_S ,本振频率为 f_L , f_L 高于 f_S 一个中频 f_i ,另外有一个干扰信号,其频率为 f_n 。 f_n 正好高于 f_L 一个中频,或者接近高于一个中频,由于变频前高频电路的选择性差,当接收机接收所需信号 f_S 时,干扰信号 f_n 也可能混入,两者同时在混频电路与本振频率混频,其差频都是 f_i ,混频后的滤波电路就无法加以区分,就造成了对有用信号的干扰。由于这种干扰信号和有用信号如同镜像一样,对称地分布在本振频率的两侧,故称为镜像干扰。

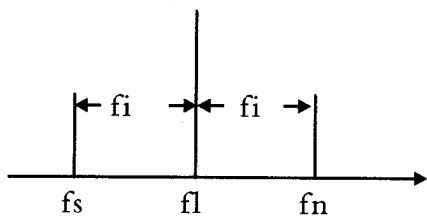


图 4—7 镜像干扰

例如,接收的信号频率为 150.000MHz ,设中频选定为 455KHz ,则本振频率为 150.455MHz ,镜像干扰的频率则为

$$f_S + 2f_i = 150.930\text{MHz}$$

镜像干扰的频率与接收信号的频率,相差如此小,在工作频率很高的高频信号回路里,是很难加以抑制的。

为了增强接收机抑制镜像干扰的能力,一是提高变频前高频信号回路的选择性,根据前面对阵振电路通频带的分析,这种努力的效果是很有限的;再就是把中频选高一些,使镜像干扰的频率与所需信号的频率差拉大,有利于变频前对镜像干扰的抑制。

中频选高一些,固然有利于提高抑制镜像干扰,但不利于对混频后中频信号的选择与放大,为了解决这个矛盾,工作于超短波及微波段的接收机,在变频前都设有两级(或更多级)频率搬移电路,称为两次混频或两级超外差式接收机。

第一中频选高一些,有利于抑制镜像干扰。第二中频选低一些,有利于提高中放级的稳定增益和抑制邻道干扰的能力。由于变频而设置的中放级,是决定接收机灵敏度及选择性的主要部位。

§ 4—3 各类信号的解调方法

一、对调幅信号的解调

无论是调频,调幅或单边带接收机,无论是接收电话或电报信号,其解调前的电路组成以及解调后的低频放大,都基本上是相同的或相似的。其主要区别在于解调的方法及原理不同,有关解调的电路组成也不一

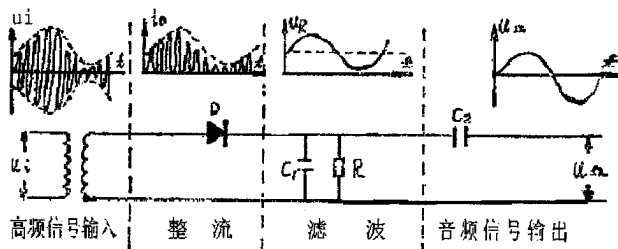


图 4—8 检波器电路及波形

样。本节分别作一简单介绍。

对调幅信号的解调装置,叫做检波器,它是利用二极管的单向导电作用,把调幅波进行整流,然后由 RC 组成的低通滤波器,取出音频信号电压,将其各种成分滤除,如图 4—8 所示。

如果从频率搬移的观点来看,检波也是一次频率搬移,因为调幅波中含有载频及上下边带,二极管电路是一个非线性电路,因而产生载频与其上边带或下边带的差频,例如信号载频 f_i 为 455KHz,上边带为 455.3—458KHz,下边带为 452~454.7KHz,则无论是上边带与载频之差,或载频与下边带之差:都是 0.3~3KHz 的话音频带,如图 4—9 所示。检波电路所产生的其它各种频率成分,包括载频及其与边带的和频等,都远高于话音频谱,都被 RC 滤波器中的电容旁路。所谓低通滤波器就是只让某一限值以下的频带通过,高于此限值的频率分量则不能通过。例如此处只允许 3KHz 以下的话音频带通过。

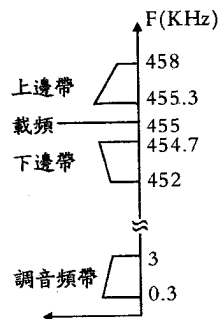


图 4—9 检波时的频率搬移

二、对调频信号的解调

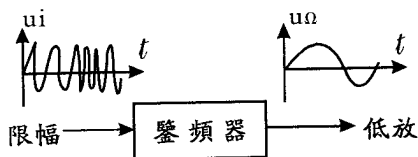


图 4—10 鉴频的波形变换

对调频信号的解调装置,叫鉴频器。鉴频器的种类很多,电路组成也比检波器复杂一些,它的基本原理可以分解为两步,即把已调信号的频率变化为相应的振幅变化,再由振幅变化还原为音频信号。实际上,在鉴频过程中这两步是无法分开的。图 4—10 是鉴频前后的波形变换示意图。

三、对单边带信号的解调

由于单边带信号是抑制载频输出的,经过接收机的几次频率搬移后,仍然是没有载频的单边带信号,解调时必须插入载频,才能还原为话音频带信号。如图 4—11,经过两次混频,虚载频为 f_i 的两个独立的单边带话,分别经上下边带滤波器取出各自的边带信号,分别送入各自的解调器。图中画出上边带话的解调电路组成,下边带话也是一样的。解调器实际上就是环形调制器或平衡调制器,插入的载频必须准确地和信号的虚载频一致,才能不失真地解调出原调制的音频信号。所以,插入的载频通常由频率合成器提供,以保证所必须的频率准确度和稳定度。插入的载频就是起恢复被抑制了的载频的作用,两者在解调电路中混频,由低频滤波器输出它们的差频,即输出为话音频带。

如果插入的载频,不能准确地等于信号的虚载频,则解调后的音频信号,也就不是原先调制的话音频谱,发生严重失真,甚至根本无法收听。例如,设信号的虚载频为 455KHz,上边带话为 455.3—458KHz,若插入的载频不是 455KHz,而是 454KHz,则解调后的音频信号频谱为 1.3—4KHz,这和原来的话音频谱有很大的区别,很难以收听

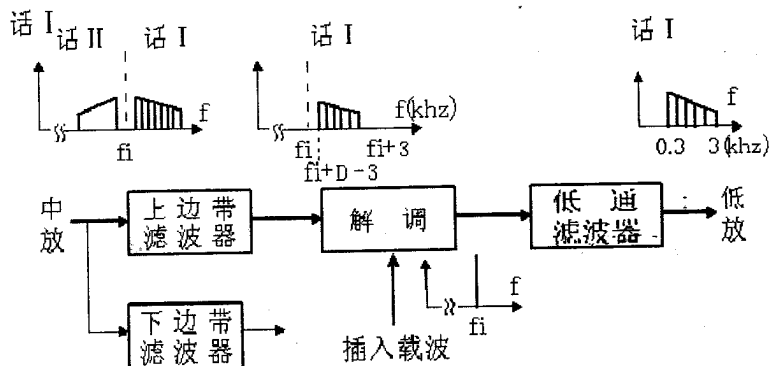


图 4—11 接收单边带话的解调电路

了。一般要求收话时,插入载频误差的绝对值应小于 60Hz。

四、接收等幅报的方法

由振幅键控发送的,控制高频输出通断的电报信号,通称为等幅报,如图 4—12,如果把等幅报直接送入检波电路,则经过整流、滤波,输出为断续的直流,将此信号送入耳机或扬声器,则只能听到随发送端电键起落,接收机输出断续直流的“喀、喀”声,根本无法抄收电码信号。

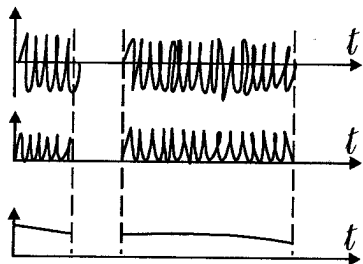


图 4—12 等幅报直接检波时的波形

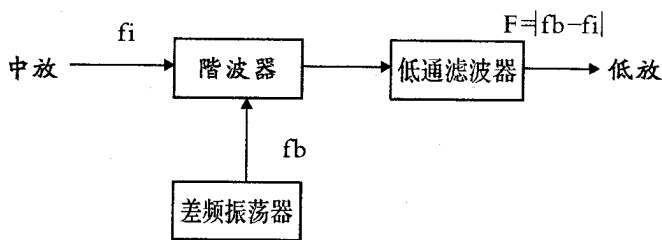


图 4—13 接收等幅报的电路组成

解决的办法,就是在接收机内设置一个等幅振荡器,见图 4—13,其振荡频率 F_b 与由末级中放来的中频信号频率 f_i 相差一个音频 F , 并且其频率可在一定的范围内调整。这个振荡器叫差频振荡器。等幅报信号与差频振荡电压同时送入检波器或其它混频电路,利用检波或混频电路的非线性,产生它们的和频,差频及其它许多频率成分,由低通滤波器取出它们的差频即音频 F 。例如,信号中频 f_i 为 455KHz, 差频振荡器的振荡频率 f_b 为 454 或 456KHz, 则其差频 F 为:

$$F = |f_b - f_i| = 1\text{KHz}$$

这样,受电码符号控制的 1KHz 音频信号,经低放送入耳机,就可以发出“的答”的电码声。

上述接收等幅报的方法, 叫做差拍检波法。如果改变差频振荡器的频率 f_b , 则两者的差频 F 也随之改变, 音调也随之变化。

如图 4—14, 当 $f_b = f_i$ 时, $F = 0$, 叫做零差, 接收机输出没有信号声。 F_b 与 f_i 频差愈大, 则输出信号的频率愈高, 即声音尖; 反之声音粗。因而可以通过改变差频振荡器的频率而改变收报音调, 以得到悦耳的声音。

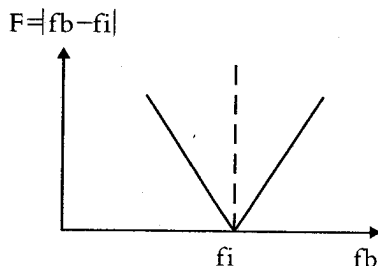


图 4—14 差拍检波的音调

五、接收移频报的方法

通常在固定式或车载式的单边带电台设有移频报, 利用一个话路传送一路或多路报, 图 4—15 是接收一路移频报的电路组成方框图。各部分的作用如下:

窄带中放 从信号频带中分离出电报信号。

限幅 消除干扰引起的振幅变化。

译码 将等幅的移频电报变成正负极性的直流电报脉冲。

如果是印字报, 则将上述直流电报脉冲, 经直流放大, 再由电子继电器变成有电、无电脉冲, 控制电传打字机,

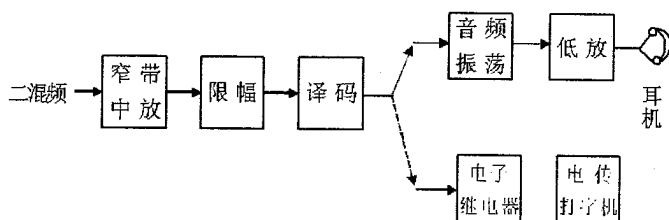


图 4—15 接收移频报的电路组成

使其打印出报文。

如果是手键报，则经直流放大后，也由有关电路输出有电、无电脉冲，控制音频振荡器，使其输出音频电码信号。

§ 4—4 接收机的附加电路

接收机除了上述的频率变换，放大，选择及解调等基本组成外，还有许多附加电路，以起到或增强某种功能，确保接收机的正常工作的作用。下面介绍几种附加电路。

一、自动增益控制 (AGC)

接收机一般都设有音量控制旋钮，它是改变解调后输入低放级音频信号电压的大小，以调节音频输出功率。但是，遇有强信号输入时，调节音量旋钮，虽可使声音减小，却不能改变高放及中放级的放大量，这些放大级可能因输入信号太强而产生过荷失真，甚至阻塞。另外，我们在电波传播中将要讲到，无论是短波，还是超短波，微波通信，都可能由于多径传输而造成信号衰落现象，即信号不规则地剧烈变化。对于这种情况，用人工调节音量是无法使输出稳定的。

自动增益控制电路就是用以解决上述问题的。图 4—16 是一般的自动增益控制电路方框图，它的基本原理是把变频、中放后的信号进行检波和滤波，取其直流电压，加到高放和中放级的偏置电路，以控制其增益。当输入信号较强时，经检波，滤波输出的直流电压就大，加到被控级的反向偏置电压就大，使其增益降低；反之，使其增益相对提高（实际上是比较强信号输入时增益降低的少一些）。这样，即使信号强度剧烈变化，接收机输出却相对平稳。同时，也可避免或减轻因强信号输入而使高、中放发生过荷现象。

由于自动增益控制电压总是要降低被控级的增益，这样会降低接收机接收微弱信号的能力。为了解决这个问题。许多接收机设置延迟式自动增益控制电路，只有输入信号强到一定数值后，AGC 电路才起作用，这就避免了输入信号本已很弱时，也要降低被控放大级增益的缺点。

自动增益控制电路的检波器，如果是调幅接收机，则可与信号的解调合二为一，不必另设检波器了。

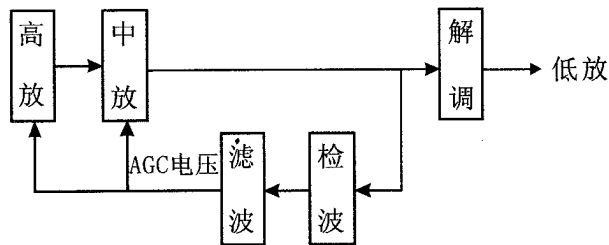


图 4—16 自动增益控制电路方框图

二、自动频率微调 (AFC)

在通信中，如果发射机的载频不稳定，或者接收机的本振频率不稳定，都会使接收机的输出信号忽强忽弱，时有时无，收听困难，甚至会中断联络。为了解决这个问题，在有些接收机中，特别是在没有采用频率合成器的调频接收机中，常设有自动频率微调电路。

图 4—17 是自动频率微调电路的方框图。如果接收机调谐准确，本振频率 f_L 与信号的中心频率 f_s 正好相差一个中频 f_i ，经混频、中放，输送到鉴频器的中频 f_i 等于鉴频器的谐振频率 f_0 ，鉴频器的输出电压经滤波后，控制电压 U_c 为零，压控振荡器即本振的频率不变。

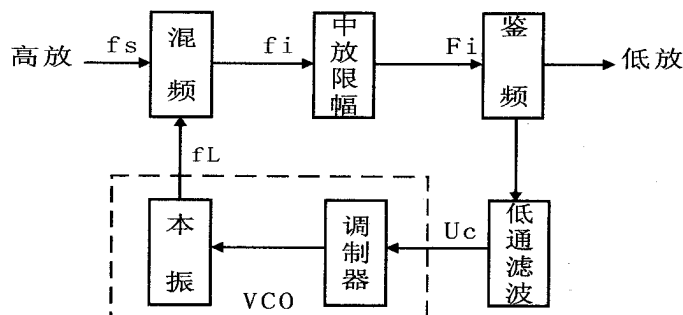


图 4—17 自动频率微调电路方框图

如果接收机调谐不准确,或者发射机、接收机的振荡频率不稳定,都会使混频后的中频偏离规定的数值.即 f_i 不等于鉴频器的谐振频率 f_o 。经鉴频、滤波后,就会输出一个正的或负的控制电压 U_c ,通过变容二极管控制本振频率,使 f_L 相应降低或增高。经过系统的连续控制作用,最后稳定在某一平衡状态,使混频后的中频基本上处于谐振状态。当然,自动频率微调电路只能在一定范围内起作用,频率相差太远就无法微调过来了。

三、自动调谐电路 (ATC)

接收机的输入电路、高放级输出的调谐电路,通称为高频信号回路,要求对所接收的信号频率调谐,并与本振频率保持相差一个固定中频值的线性变化关系。在一般的接收机中是用三个同轴调整的可变电容器,进行统一调节,叫做统调跟踪。跟踪就是使高频信号回路的谐振频率与本振频率保持一个固定的差值。例如,接收机的频率范围是 $150\sim 170\text{MHz}$,则高频信号回路的谐振频率范围应是 $150\sim 170\text{MHz}$,设第一中频为 21.8MHz 。则一本振频率范围应是 $171.8\sim 191.8\text{MHz}$ 。

用手工调谐,既麻烦又不易调准确。自动调谐电路,就是用来解决这个问题的。如图 4—18,根据所接收的信号频率 f_s 置定频率合成器输出频率 f_L 。例如接收的信号频率为 150MHz ,设定接收机面板显示频率为 150MHz 时,实际上是置定 f_L 为 171.8MHz 。此时由频率合成器的输出,经 ATC 电压产生电路,输出一个控制电压,调节高频信号回路变容二极管的电容,使高频信号回路与所接收的信号谐振。当接收的信号频率改变时,频率合成器的输出频率改变,使 ATC 控制电压的大小相应变化,从而使高频信号回路的调谐频率也随之改变。

这样,用电调谐代替机械调谐,既迅速,又准确。

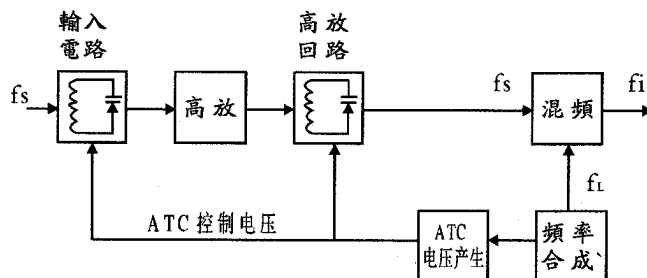


图 4—18 自动调谐原理图

§ 4—5 接收机的主要技术特性

一、灵敏度

接收机的灵敏度是指其接收微弱信号的能力。灵敏度的定义是：保持接收机输出端一定的信号噪声比和一定的音频输出功率情况下，接收机输入端所需要的最小感应电势，通常以微伏值表示。

所谓信号噪声比，是指接收机信号输出功率（实际上是信号与噪声输出功率之和）与无信号时噪声输出功率之比值，简称信噪比，以 S/N 表示。信噪比是影响接收机灵敏度的重要因素，规定信噪比指标，是为了保证接收信号的清晰度。一部接收机的噪声输出愈大，为了保证必要的清晰度，则需要接收天线输入的信号感应电势也愈大，即灵敏度愈低。要提高接收的灵敏度，除了注意提高接收机的总增益特别是前置放大大部分的增益外，尤其是要设法降低接收机的噪声，提高信噪比。

一般接收机要求信噪比为 20 分贝，即信号输出功率是噪声输出功率的 100 倍。测试时要求输出的音频功率不小于额定输出功率的 50%。

有的接收机采用了信纳比灵敏度或可用灵敏度这一概念，它是把接收机失真的因素也考虑进去。所谓信纳比，就是指接收机输出信号 S 、噪声 N 及失真 D 三者之和与噪声、失真两者之和的比值，即

$$\text{信纳比} = \frac{S + N + D}{N + D}$$

显然，这样规定的灵敏度，更较符合实际工作状态。

二、抑噪灵敏度

调频接收机的特点是：当接收机没有任何信号输入时，噪声输出最大；当对方按键不发话，即仅载波输入时，噪声即显著下降。我们把能使接收机噪声下降 20 分贝的未调制射频电压值，称为接收机的抑噪灵敏度。在接收机的说明书上，还常常标明有静噪开启灵敏度，它是指静噪控制置于门限位置时，为使接收机电路开始工作，所需要的输入标准测试信号的电压值。对调频接收机所用的标准测试信号，是指调制频率为 1 千赫，频偏为最大频偏的 60%，中心频率为接收机额定频率的测试信号。

三、邻道选择性

邻道选择性是指接收机接收有用信号抑制邻近信道干扰的能力。接收机的邻道选择性主要由接收机中频部分的滤波器性能决定。为避免邻近信道发射机的干扰，接收机的邻道选择性应不小于 60 分贝。

四、调制接收带宽

接收机为了不失真地传输信号，它的中频滤波器必要的带通宽度，叫调制接收带宽。它是根据发射机的发射带宽、发射频率和接收机本振频率的偏差以及接收机中晶体滤波器中心频率的偏差来决定的。接收机的调制接收带宽过窄，会使信号频带中许多边频被抑制而增大失真；过宽，则会增大干扰和噪声输出。

一般接收机的调制接收带宽为 ± 5 千赫 $\sim \pm 7.5$ 千赫。

五、寄生响应抑制度

由于超外差接收机的工作特点，如果其前端电路的选择性较差，则某些较强的干扰信号，如镜象干扰、中频干扰、组合干扰等，就有可能进入第一混频级，造成对有用信号的干扰，称为接收机的寄生响应。寄生响应抑制度就是用来表示接收机抑制这些干扰能力的指标。由于这些干扰信号的频率分布很广，通常分别对某些特种干扰提出具体的抑制（抗拒）指标。最常见的有镜象抗拒比和中频抗拒比两种。

镜象抗拒比是指接收机抑制镜象干扰的能力。前面已经讲过，所谓镜象干扰是指和有用信号载频相差两个中频，与有用信号载频对称地分布在第一本振频率两侧成镜象关系的一种特有干扰。它进入第一混频级后，

就与本振频率差拍，其差频正好等于或接近于接收机的第一中频，造成对有用信号的干扰。对于镜像干扰，接收机混频后的电路无能为力，只有靠提高前端电路的选择性来解决。一般接收机的镜像抗拒比应不小于 70 分贝。

中频抗拒比是指接收机抑制中频干扰的能力。如果接收机前端电路的选择性较差，一些等于或接近于本机第一中频频率的较强干扰信号、就有可能通过第一混频，直接进入中放级进行放大，造成对有用信号的干扰，称为中频干扰。同样，抑制中频干扰也主要靠提高接收机前端电路的选择性来解决。

上述干扰，又称为超外差接收机的特有干扰，由于它们离接收机的工作频率较远，比较容易抑制，因而在系统设计时，也可以不予考虑。

六、互调抑制度

当两个或多个强干扰信号进入接收机前端电路时，由于高放和混频级的非线性作用，产生它们的各次谐波及其组合频率，即相互混频，若混频产物落在接收机通带之内，就会形成接收机的互调干扰。

互调抑制度又称互调抗拒比，是指接收机抑制能产生互调干扰的两个或多个干扰信号造成互调干扰的能力。一般要求不小于 40~50 分贝。

接收机互调同发射机互调一样，是通信网中引起干扰的一个主要原因。因此，在系统设计时，要采取多种措施，尽量减小互调干扰。本书在第五章干扰与噪声中，还要进一步讨论有关互调干扰的问题。

七、音频输出功率

音频输出功率是指在接收机输入端按测试灵敏度要求输入标准测试信号，调节音量旋钮，使失真不大于额定值的最大音频输出功率。

八、谐波失真

谐波失真也就是非线性失真。在接收机中，多是由于解调及低放电路的非线性引起。接收机的非线性失真系数通常应小于 10%。

(未完待续)

无线电通信基本原理

编者按：本教材是北京市无线电管理委员会（现北京市无线电管理局）在 1988 年编印的。全部内容共分八章，简明扼要、深入浅出地阐述了无线电通信的概念、电磁波基本知识、收发信机的组成，电波传播以及干扰等无线电基础知识，曾被北京市无线电管理委员会作为培训北京市各机关、企、事业单位通信管理人员的专用教材。《业余无线电台》将陆续刊登该教材的部分内容，供广大无线电爱好者自学、参考。（接上期，连载四）

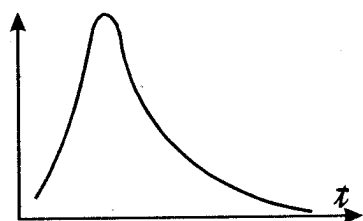
第五章 干扰和噪声

§ 5—1 干扰和噪声的性质

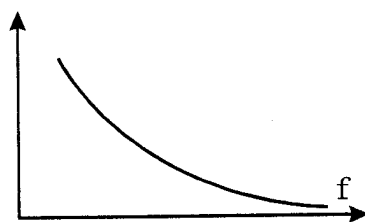
干扰和噪声是使通信性能变坏的重要因素。接收机能否正常工作，不仅取决于接收机输入信号的大小，而且取决于干扰和噪声的大小。当接收机本身的噪声电平很高时，要保证一定的信噪比，则必须增大接收机输入信号的电平，即接收机的灵敏度要下降，如果接收地区外部噪声或环境噪声很高时，即使接收机的灵敏度很高，也难以正常工作，这就要求输入信号必须有更高的电平，才能保证必要的信噪比。也就是说，干扰和噪声会使接收机的实际灵敏度大大下降。

一般来说，干扰来自外部，如其它无线电台对本台工作产生的多种干扰；噪声有来自内部，如接收机的内部噪声，也有来自外部，如各种自然噪声和人为噪声。自然噪声包括天电噪声和宇宙噪声等，人为噪声主要指各种电气设备所产生的噪声。

干扰和噪声虽然来源不同，特性不一样，但最终都是干扰接收机的正常工作，影响对有用信号的接收，因而可统称为干扰。



时间关系



b 能量—频率关系

a 能量—

图 5—1 脉冲干扰

干扰和噪声按其性质可分为三种类型：

一、周期性干扰

周期性干扰是指各种无线电台的干扰及一些医疗器械中高频振荡器的干扰等。其特点是干扰频谱不连续，只是在其基波，各次谐波及一些组合频率上产生干扰。

这种干扰会使接收机同时输出多个信号或出现啸叫声。

二、脉冲干扰

脉冲干扰是指一个或一系列不连续的短促脉冲, 强度很大, 但持续时间很短, 见图 5—1a。如大自然的放电现象, 在极短时间内电压可达数百万伏, 电流峰值可高达百万安以上。脉冲干扰属于非周期的随机干扰。其频谱范围很宽, 但其能量分布随频率升高而降低, 见图 5—1b。脉冲干扰对长波、中波通信影响较严重, 短波次之, 对超短波, 微波的影响则很小, 可以忽略。

脉冲干扰作用于接收机时, 使耳机发出刺耳的“喀喇”声。

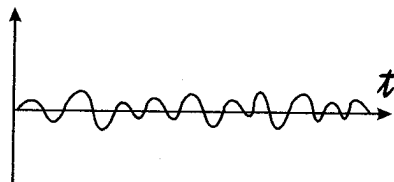


图 5—2 起伏干扰

三、起伏干扰

起伏干扰是一种连续而不规则的干扰, 如图 5—2 所示。接收机的内部噪声就属于这种性质。其频谱分布范围很宽, 几乎在整个无线电波段内都均匀地分布。接收机的通频带愈宽, 则受其干扰愈重, 这也是有必要限制接收机通频带的原因之一。

起伏干扰作用于接收机时, 使耳机发出连续的“沙沙”声。

§ 5—2 噪声

为讨论问题方便, 我们把电台干扰以外的各种干扰与噪声, 统称为噪声。

一、接收机内部噪声

接收机内部噪声是机内器件带电微粒的不规则运动所引起的电起伏现象, 经过各级放大, 使输出端出现“沙沙”声。

接收机内部噪声主要来源于电阻和各种晶体管等器件, 而且和工作温度有关。工作温度愈高, 噪声电压愈大。

降低接收机内部噪声的主要措施是: 选用低噪声器件; 适当压缩接收机通频带; 降低工作温度, 设置静噪电路等。

二、外部自然噪声

外部自然噪声主要指天电噪声和宇宙噪声。

天电噪声是发生在大气层中的各种电磁现象引起的, 又称大气噪声。最主要的天电噪声是雷电引起的。此外, 象带电的雨雪、风沙天气的尘埃运动等都会引起放电现象。雷电在地球上平均每秒钟发生 100 次以上, 在南方特别是多雷地区尤为严重。

天电噪声或天电干扰属于脉冲性质, 其能量分布随频率升高而降低, 对超短波及微波通信几乎不发生影响。

宇宙噪声是大气层以外各天体辐射的电磁波所引起的一种起伏性干扰。宇宙噪声中由太阳引起的噪声与太阳的辐射及太阳的黑子数有关。太阳黑子数多的年份, 宇宙噪声也加重。

宇宙噪声的能量分布也随频率升高而降低。

三、人为噪声

人为噪声是由汽车点火系统, 高频加热设备、电力线、电机、电焊等工业电器设备中电流或电压的剧烈变化而引起的电磁辐射造成的。在城市中各种噪声源比较集中, 所以城市的人为噪声比郊区及农村大。特别是随着汽车数量的日益增多, 汽车点火噪声已成为城市噪声的主要来源。

人为噪声多属于脉冲性的, 大量噪声混在一起还可能形成连续性噪声, 或连续性噪声叠加有强烈的脉冲

性噪声。频谱分析表明,这种噪声的频谱较宽,但噪声强度也随频率升高而下降。

通常,人为噪声源的数量和集中程度随地点和时间而异,故人为噪声就地点上或时间上来说,都是随机变化的。一般噪声源的直射影响距离约为200—400米,但随电力网传播可达5~10公里。因而,天线、电台位置的选择很重要。在可能的情况下,选择较高的地形,天线架高一些,尽量远离各种噪声源,机房内引进的电源线要加滤波装置(见图5—3),在接收机上设置噪声限制器等,都可以在一定程度上抑制或减轻人为噪声的干扰。

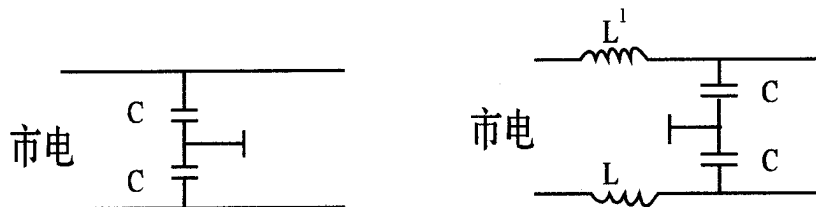


图 5—3 电源线上的滤波装置

图5—4是各项噪声随频率的分布关系,纵坐标表示的噪声系数 F 是以 $KToB$ 为 $0dB$ 的分贝值。其中 K 是波尔兹曼常数, B 是接收机的噪声有效带宽, To 是参考温度,即绝对温度的 $290^{\circ}K$ 。图中各项噪声的噪声系数大都是随频率升高而降低;唯接收的内部噪声几乎是在整个无线电频段均匀分布,而且随频率升高而有所增大,在800兆赫以上频段工作的无线电台将主要受城市人为噪声和接收机内部噪声的影响。

§5—3 互调干扰

一、互调干扰及其产生原因

所谓互调干扰,就是两个或多个干扰信号,同时进入接收机的前端电路或发射机的末级电路,由于这些电路的非线性作用,产生它们的各次谐波以及其组合频率,称为互调,如果互调的产物正好落在有用信号的频带内,就造成干扰,称为互调干扰。

我们假定接收机接收的干扰信号频率为 f_1 、 f_2 、 f_3 等。由于接收机高频及混频电路的非线性,产生互调。如果满足下列关系:

$$|mf_1 \pm nf_2| = f_s \quad \text{或} \quad |f_1 + f_2 - f_3| = f_s$$

就产生互调干扰。上式中, m 、 n 均为正整数。若 $m+n=3$,则称为三阶互调, $m+n=5$ 。则称为五阶互调。三个以上干扰信号互调时,各系数之和,就是其互调的阶数。通常,主要考虑三阶互调和五阶互调,特别是三阶互调,因为阶数愈高,影响也愈小。

为什么各干扰信号会产生互调呢?这需要用非线性电路的频率变换特性来说明。

如果在一个电路中,电流与输入的电压成线性关系,即: $I=ku$,则称此电路为线性电路,如图5—5中的虚线所示。各种信号通过线性电路,不会产生新的频率分量,即原来有哪些频率成分,输出时仍然是那些频率成分,也就是不产生互调,理想的放大器就应该是这样。

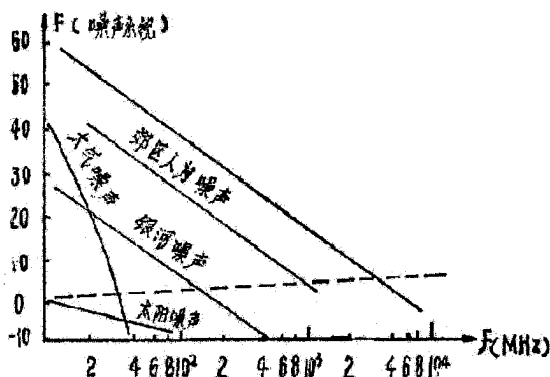


图 5—4 各项噪声随频率分布关系

实际上,接收机和发射机的各放大器,都不可能是理想的线性放大器,特别是接收机的混频级,发射机末级功率放大,本身都是非线性运用,因而其电流和电压的关系不是直线关系;而是某种曲线关系,如图5-5中的实线所示。很准确地来表述各种非线性电路的电流电压关系,是很困难的,一般晶体管电流与电压的转移特性,大体上可以用幂级数来表示,即

$$i = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3 + \dots$$

式中:……,是由晶体管特性决定的常数。

如果用单一频率的信号,送入非线性电路。即

$$u = U \cos \omega t$$

$$\text{则 } i = a_0 + a_1 U \cos \omega t + a_2 U^2 \cos^2 \omega t + a_3 U^3 \cos^3 \omega t + \dots$$

按有关三角及代数公式展开,则得

$$I = a_0 + \frac{a_2}{2} U^2 \quad (\text{直流分量}) + (a_1 U + \frac{3a_3}{4} U^3) \cos \omega t \quad (\text{基波分量})$$

$$+ \frac{a_2}{2} U^2 \cos 2\omega t \quad (\text{二次谐波分量}) + \frac{a_3}{4} U^3 \cos 3\omega t \quad (\text{三次谐波分量}) + \dots$$

可见,输入单一频率的信号电压,经晶体管的非线性变换后,除输出与原来相同的基波分量外,还会产生二次谐波,三次谐波等许多新的频率成分。利用 LC 电路的选频作用就可以选取所需要的某次谐波,而将基波及其它不需要的各次谐波滤除,发射机中的倍频器,就是这样工作的。但对于放大器来说,这种非线性变换是有害的,它会使放大器的信号产生非线性失真。

如果用两个不同频率的信号,同时送入非线性电路,设:

$$u_1 = U_1 \cos \omega_1 t$$

$$u_2 = U_2 \cos \omega_2 t$$

$$\text{则 } i = a_0 + a_1 (U_1 \cos \omega_1 t + U_2 \cos \omega_2 t)$$

$$+ a_2 (U_1 \cos \omega_1 t + U_2 \cos \omega_2 t)^2 + a_3 (U_1 \cos \omega_1 t + U_2 \cos \omega_2 t)^3 + \dots$$

按有关三角及代数公式展开,得出其中一次项: $a_1 U_1 \cos \omega_1 t + a_1 U_2 \cos \omega_2 t$

二次项:

$$\begin{aligned} & \frac{a_2}{2} U_1^2 + \frac{a_2}{2} U_1^2 \cos 2\omega_1 t + \frac{a_2}{2} U_2^2 + \frac{a_2}{2} U_2^2 \cos 2\omega_2 t \\ & + a_2 U_1 U_2 \cos (\omega_2 + \omega_1) t + a_2 U_1 U_2 \cos (\omega_2 - \omega_1) t \end{aligned}$$

三次项:

$$\begin{aligned} & \frac{3}{4} a_3 U_1^3 \cos \omega_1 t \\ & + \frac{1}{4} a_3 U_1^3 \cos 3\omega_1 t + \frac{1}{4} a_3 U_2^3 \cos \omega_2 t \\ & + \frac{1}{4} a_3 U_2^3 \cos 3\omega_2 t + \frac{3}{2} a_3 U_2 U_1^2 \cos \omega_2 t \\ & + \frac{3}{4} a_3 U_2 U_1^2 \cos (2\omega_1 - \omega_2) t \end{aligned}$$

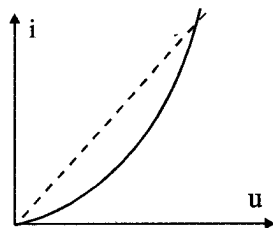


图 5-5 线性与非线性关系

$$\begin{aligned}
& + \frac{3}{4} a_3 U_2 U_1^2 \cos(2\omega_1 + \omega_2) t \\
& + \frac{3}{2} a_3 U_1 U_2^2 \cos\omega_1 t + \frac{3}{4} a_3 U_1 U_2^2 \cos(2\omega_2 - \omega_1) t \\
& + \frac{3}{4} a_3 U_2 U_2^2 \cos(2\omega_2 + \omega_1) t
\end{aligned}$$

可见,不同频率的信号电压进入非线性电路后,除产生各自的基频及谐频外,还产生它们的组合频率,如 $\omega_1 \pm \omega_2$, $2\omega_1 \pm \omega_2$, $2\omega_2 \pm \omega_1$ 等,如果将幂级数展开的项次更多,还会有更多的组合频率,如 $3\omega_1 \pm 2\omega_2$, $3\omega_2 \pm 2\omega_1$ 等等。这些组合频率可以用 $|m\omega_1 \pm n\omega_2|$ 或 $|mf_1 \pm nf_2|$ 来代表。

在收发信中,调幅、混频、检波等电路就是利用这种非线性变换来进行频率变换或频率搬移的。但是,不必要的互调,则会增加对有用信号的干扰,是我们应当力求避免的。

二、接收机互调

由于接收机前端电路的通频带较宽,当两个或多个邻近于有用信号频率的干扰信号进入高放或混频级时,则通过它们自身的非线性作用,产生互调,若互调产物落入接收机通带内,就会造成接收机的互调干扰。

假定在一个地区内,使用彼此相邻,频率间隔相等的若干个信道,各信道间隔 Δf 均为5千赫。某接收机在 f_s 上接收信号,另外有两部发射机工作在相邻近的信道上,其发射频率分别为:

$$f_1 = f_s + \Delta f$$

$$f_2 = f_s + 2\Delta f$$

当接收机前端电路的选择性较差,它们完全有可能进入接收机,产生互调,其三阶互调产物: $2f_1 - f_2 = 2f_s + 2\Delta f - f_s - 2\Delta f = f_s$

和有用信号频率相同,这样,接收机混频级以后的电路,就很难加以抑制。

又如,三个干扰信号分别为: $f_1 = f_s + 2\Delta f$ $f_2 = f_s + \Delta f$ $f_3 = f_s + \Delta f$

则其互调产物也落在接收机通带内。为减小接收机互调干扰,要从单机和系统设计两方面考虑,主要措施有:

1、尽量提高接收机的互调抗拒比,要求优于70分贝。为此,必须在电路设计和器件选择上采取一系列措施,特别是设法提高接收机前端电路的选择性和减小放大器的非线性特性并扩大其动态运用范围。

2、移动台发射机采用自动功率控制:可以减小对基地台接收机的互调干扰。减小无线区半径,降低最大接收电平等,也有利于减小接收机的互调干扰。

3、采用无三阶互调信道组工作。

三、发射机互调

发射机的末级通常是工作于丙类的非线性放大器。当一部发射机的输出级与另一部或多部发射机的输出信号耦合时,通过它本身的非线性作用,将产生很多互调产物,互调产物又通天线辐射出去,因而对工作于互调产物频率的接收机产生干扰。

设基地台两部发射机分别工作于 f_1 及 f_2 ,两发射机输出信号可以通过发射天线共用器发生耦合,或者虽分用天线,而彼此距离不可能很远,也会有一定的耦合。此时发射天线除辐射 f_1 及 f_2 外,还会有许多互调产物向外辐射,如 $2f_2 - f_1 = f_3$,若 f_3 正好是另一部接收机的工作频率,就会对该

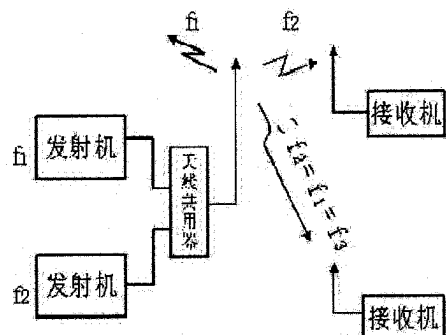


图5—6 发射机互调

接收机产生干扰(见图 5—6)。

减小发射机互调干扰的主要措施是：尽量增大各发射机间的耦合损耗，采用共用天线时，应有良好的隔离度；各发射机分用天线时，应尽量增大各天线间的距离；发射机输出端串接环形器或单向器，在发射机输出端和馈线之间插入高质量的带通滤波器，发射机，馈线，共用器，天线之间必须良好地匹配，避免因信号反射而加大耦合，馈线应屏蔽良好，并避免因多根馈线相互靠近而增大耦合等。其它如移动台发射机采用自动功率控制，选用无三阶互调信道组工作等，同减小接收机互调干扰的措施一样。

四、无三阶互调信道组

在一个频段中，如果每隔一个相等的频距设置一个信道，则可提供许多等间隔的信道。例如在 151.000—154.975 兆赫频段，每隔 25 千赫设置一个信道，则在此 4 兆赫的带宽内，可提供 160 个信道，在分配信道时，是否可以任意选取若干个信道为一组分配给用户呢？不是的。因为不经过严格计算和挑选，任意分配信道，特别是使用相邻的等频距信道，会产生严重的互调干扰。那么，在分配信道时，能否适当选择不等频距的信道，使它们产生的互调产物不落入任一工作信道呢？答案是肯定的。我们可以通过计算，找出无三阶(或无五阶)互调干扰的信道组。选择这些信道组的原则是：从互调干扰上看，本系统内应无三阶(或五阶)互调干扰；从频率的有效利用上看，应尽量提高频段利用率，也就是说，应找出占用频段最小的无三阶(或无五阶)互调干扰组。根据上述原则、我们列出无三阶互调干扰信道组(表 5—1)如下：

利用表 5—1 可以很方便地选出无三阶互调干扰的一组信道。例如，需用信道数为 5，第一信道频率为 151 兆赫，信道间隔 Δf 为 25 千赫，则可选用的各信道频率分别是：

$$F_1 = 151.000 \text{ MHz}$$

表 5—1 无三阶互调干扰信道组

需用信道数	最小占用信道数	无三阶互调的信道组 (数字为信道序号)	频段利用率
3	4	1, 2, 4。	75%
4	7	1, 2, 5, 7; 1, 3, 6, 7。	57%
5	12	1, 2, 5, 10, 12; 1, 3, 8, 11, 12。	42%
6	13	1, 2, 9, 13, 15, 18; 1, 2, 5, 11, 16, 18; 1, 2, 5, 11, 13, 18; 1, 2, 9, 12, 14, 18;	33%
7	26	1, 2, 8, 12, 21, 24, 26; 1, 3, 4, 11, 17, 22, 26; 1, 2, 5, 11, 17, 22, 26; 1, 3, 8, 14, 22, 23, 26; 1, 2, 12, 17, 20, 24, 26; 1, 4, 5, 13, 19, 24, 26; 1, 5, 10, 16, 23, 24, 26;	27%
8	35	1, 2, 5, 10, 16, 23, 33, 35。	23%
6	45	1, 2, 6, 13, 26, 28, 36, 42, 45。	20%
10	56	* 1, 2, 7, 11, 24, 27, 35, 42, 54, 56。	18%

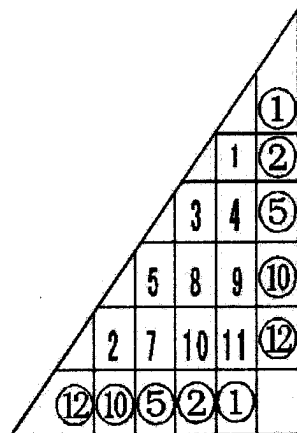


图5—7 检验无三阶互调的数字三角形

$$f_2 = f_1 + \Delta f = 151.025 \text{ MHz}$$

$$f_5 = f_1 + 4\Delta f = 151.100 \text{ MHz}$$

$$f_{10} = f_1 + 9\Delta f = 151.225 \text{ MHz}$$

$$f_{12} = f_1 + 11\Delta f = 151.275 \text{ MHz}$$

即选用 5 个无三阶互调干扰的信道；共占用了 12 个序号的频段，即占用了 $25 \times 12 = 300$ 千赫的频段。

通过对表 5—1 分析, 可以发现这样一个规律, 即任意两个信道序号之差是不重复的。这就是说, 在一个信道组内, 若任何两个信道序号之差值不相等, 则该信道是无三阶互调干扰信道组, 否则, 就有三阶互调干扰。

我们仍然以上面所举的选用 5 个信道的例子, 来检验各信道序号差, 有无重复。检验时可以按图 5—7 所示的方法, 写出任意两信道序号的差值, 构成一个数字三角形, 其中圆圈内的数字是信道序号, 两信道交叉格内的数字, 就是它们的序号差值。可以看出, 圆圈内数字差值均不相等, 说明该信道组是无三阶互调干扰信道组。

由表 5—1 可见, 当选用无三阶互调信道组工作时, 在占用的频段内, 只能使用一部分信道, 而且需用的信道数愈多, 频段利用率愈低。因此, 当需用的信道数很多或在频率拥挤的地区, 这样选用信道是很不经济的。在这种情况下, 可以采用划分无线电小区的办法, 每个小区使用的信道数较少, 就可以利用信道分区分组的办法来提高频段利用率。

还需要说明的是, 采用无三阶互调信道组工作时, 三阶互调产物依然存在, 只是不落在本系统的工作信道之内, 因而本系统各工作信道不产生三阶互调。但是, 三阶互调产物可能落入其它系统, 造成对其它系统的干扰。

§ 5—4 其它电台干扰

由于无线电通信事业的发展和广泛应用, 使得在一个地区内大量电台密集, 空间电波十分拥挤, 各电台之间的相互干扰日益成为严重的问题。电台干扰的方式很多, 除上述互调干扰外还有以下几种:

一、同频干扰

同频干扰又称同信道干扰, 指工作频率相同的电台之间的干扰。在电台密集的地区, 由于频率管理或系统设计不当, 例如, 同信道电台之间的距离不够大, 就会造成同频干扰。

为了提高频率利用率, 在城市移动通信中, 常常采用划分无线电小区的办法, 在相隔一定距离的小区内, 可以重复使用同一频率, 称为频率或信道的地区复用。显然, 同信道的无线区相距愈远, 它们之间的空间隔离度愈大, 同信道即同频干扰愈小, 但频率复用率也随之降低。因此, 两者要兼顾考虑。在进行无线电区的频率分配时, 应在满足一定的通信质量要求的前提下, 确定相同频率重复使用的最小距离, 称为同信道复用最小安全距离。这要根据调制制度、电波传播特性、要求的可靠通信概率、无线区半径及选用的工作方式等多种因素进行严密的计算而确定的。

二、邻道干扰

邻道干扰是指相邻的或邻近的信道之间的干扰。它主要由于发射机的邻道功率及边带噪声辐射等落在被干扰接收机的通频带内引起的。所谓邻道功率, 是指发射机在规定的调制状态下工作。其输出落入相邻信道的功率。所谓边带噪声辐射, 是指发射机存在着以载频为中心, 分布在相当宽的范围内的寄生辐射。这些干扰如落在被干扰接收机的通带内, 接收机的选择性再好也难以抑制。

在多信道移动通信系统中, 当移动台靠近基地台时, 移动台的邻道功率及边带噪声的辐射, 将会对正在接收微弱信号的邻道基地台的接收机产生严重干扰。因为, 移动台距基地台愈近, 路径传播损耗愈小, 而基地台接收远处的移动台, 信号一般很微弱, 因而邻道干扰愈显得突出。另一方面, 基地台发射机对移动台接收机的邻道干扰, 则不是什么严重问题。因为, 这时移动台接收的是基地台信号, 信号功率远远大于邻道干扰功率。至于在基地台的收发信机之间, 因一般规定收发双工的频差足够大, 所以, 邻道干扰的可能性也很小。为了减少邻道干扰, 必须严格限制发射机调制信号的带宽, 减小发射机的寄生辐射, 提高收、发信机的

频率稳定度, 移动台发射机采用自动功率控制等。

三、镜象干扰

镜象干扰是指与有用信号频率相差两个中频, 并与有用信号频率对称地分布在一本振频率两侧的干扰信号。由于这种干扰与有用信号频率相差较远, 特别是采用两次外差的接收机, 第一中频选用了较高的频率, 两者频差达几十兆赫, 一般来说, 接收机的前端选择电路是很容易地将其抑制掉。只有特强的镜象干扰才有可能进入第一混频级, 造成对有用信号的干扰。

四、中频干扰

中频干扰是指某发射机的工作频率等于或接近于本接收机第一中频而造成的干扰。采用两次外差的接收机, 第一中频多为十几兆赫到数十兆赫, 当工作于这些频率上的发射机, 如果其功率较大, 或者距被干扰接收机太近, 其信号就有可能通过接收机的前端电路, 直接由第一混频级放大输出, 造成对有用信号的干扰。

电台干扰的方式还可以列举很多, 如由干扰信号的某次谐波同接收机本振信号的某次谐波所产生的组合干扰, 强干扰信号所产生的阻塞干扰等等, 这里就不一一列举了。

第六章 电波传播与天线

§ 6—1 电波的传播方式与特性

一、电波的传播方式

无线电波简称电波。就是在空间按一定速度传播的电磁波。电波离开发射天线后, 可能有多种传播方式, 并赋予相应的名称:

(一) 地波 就是沿地球表面传播的电波。

(二) 天波 就是向高空发射, 经电离层反射而返回地面的电波

(三) 空间波 由发射天线直接到达接收点的电波, 称为直射波。通过地面或其他障碍物反射到达接收点的电波, 称为反射波。直射波与反射波合称为空间波。陆地上近距离通信如移动通信, 主要是用空间波。

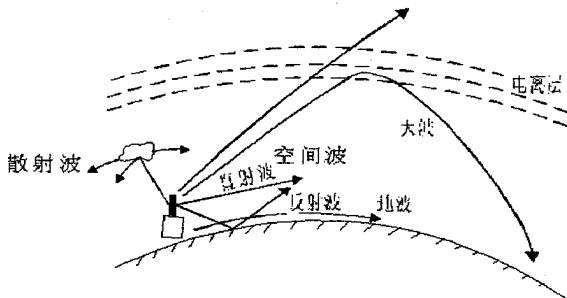


图 6—1 电波的传播方式及天线的型式、尺寸等因素决定。

二、电波的传播特性

有些电波向高空发射后, 穿透电离层不再返回地面, 或者经人造地球卫星转发回地面, 也称为空间波。

(四) 散射波 电波投射到空间大气层或电离层中的不均匀媒质上, 或者投射到流星余迹上产生散射现象, 使一部分能量到达接收点, 称为散射波。

无线电通信中, 究竟以那种电波为主, 或哪几种电波并存, 这要根据所使用的波段

电波不可能只是在无限大的自由空间传播,在其传播过程中,往往会遇到性质不同的各种障碍物,传播中的媒质如大气层也存在不均匀性等问题,这些都会对电波的传播产生影响,使电波产生反射、折射、散射、绕射、干涉及吸收等现象。电波的这些特性与光波、声波的传播有类似的现象。

(一) 电磁波的直射 电波由发射天线出发,经过大气或某一媒质直接到达接收点,叫做直射。在均匀媒质中,电波和光波一样,是直线传播的。

(二) 电波的反射和折射 当电波由一种媒质传播到另一种媒质时,在两种媒质的分界面上,传播方向要发生变化,产生反射和折射,如图 6—2 所示。

电波在两种媒质的分界面上,改变传播方向,又返回到原来的媒质,称为反射。反射时,入射角 θ_1 和反射角 θ_2 相等。

电波在两种媒质的分界面,传播方向偏折,而进入第二种媒质传播,称为折射。不同的媒质具有不同的折射系数。

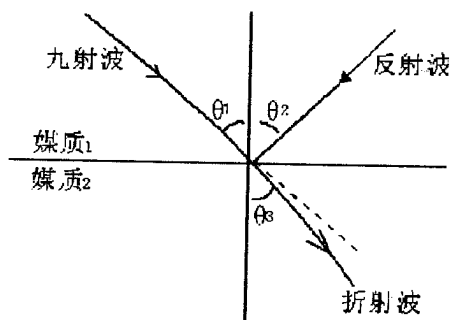


图 6-2 电波的反射和折射

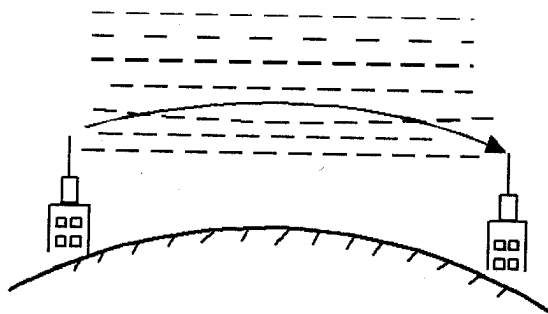


图 6-3 由媒质不均匀发生的电波弯曲现象

实际上,电波在同一媒质中传播时,由于媒质本身的不均匀性、也会产生折射现象,如图 6—3 所示。也就是说,电波在空间传播时,由于媒质的不均匀性,电波被不断折射而产生弯曲现象,使直射波变为曲射波。这种折射对无线电通信特别是对利用直射波传播的超短波通信,既可能带来有利影响,也可能产生有害后果。有利的一面,是指由于电波弯曲,而使两点间的直通距离加大,有害的一面,是指由于电波弯曲,带来多径效应,使信号不稳定。关于后一点,我们以后还要专门讨论。

电波的反射和折射现象,同光的反射、折射性质是一样的,因为光的本质也是电磁波。当光线进入空气和水的交界面时,既有反射,又有折射。例如,在水杯中投入一只筷子,会看到筷子在水下的部分发生偏折,就是光的折射作用。

(三) 电波的散射。光束照到某些物体的粗糙表面时,会产生光的散射。电波也有类似的特性。一些层状不均匀的媒质对电波产生多次局部反射而引起电波的散射,如大气中的湍流运动、流星余迹等,都能引起电波的散射。电波散射时是向四面八方散乱地辐射,其中朝斜前方射出的电波能达到很远的距离,远处的接收机如果有较高的灵敏度,就能将散射的微弱电波接收下来,实现通信。超短波电台就可以利用散射作远距离通信。

散射通信分对流层散射,电离层散射和流星余迹散射等种。对流层散射发生在离地面 5~

10 公里的空间, 通信距离约为 300~600 公里, 最远可达 1000 余公里, 电离层散射发生在离地面 80~90 公里的 D 层或 E 层, 通信距离约为 1000~2000 公里, 流星余迹散射发生在离地面 80~120 公里的大气层, 通信距离约为 1000~2000 公里。散射通信要求发信机的发射功率大, 设备复杂笨重, 只适用于固定台站使用。

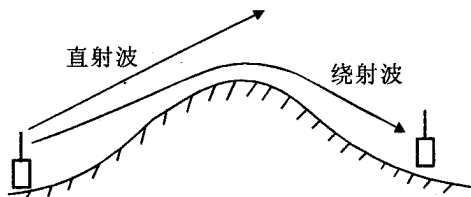


图 6—4 电波的绕射

(四) 电波的绕射 就是电波在传播过程中能绕过障碍物到达接收点, 如图 6—4 所示。这就是我们在障碍物背面有时也能收到无线电信号的原因。

电波的绕射能力与电波的波长、障碍物的几何尺寸、形状、高度、坡度等因素有关。电波的波长越长, 绕射能力越强, 反之, 绕射能力弱。特别是当波长的长度可以与障碍物的几何尺寸相比拟时, 绕射能力尤为显著。当障碍物的几何尺寸大大超过电波的波长时, 绕射就变得十分微弱, 以致会在障碍物之后, 形成没有电波的寂静区。超短波、微波的波长很短, 绕射能力很差, 因而只能作视距通信。

(五) 电波的干涉 同一天线发出的电波, 可能通过不同的途径到达接收地点。如图 6—5 中所示, 到达某一接收点的空间波是由直射波 E_1 与反射波 E_2 合成的。这样, 由两个或多个来自不同途径的电波产生迭加现象, 称为电波的干涉。

由于各路经的距离不同, 使得到达同一接收点的各电波的相位不一致, 当它们的相位相同时, 合成场强最大; 相位相反时, 合成场强最弱。由于

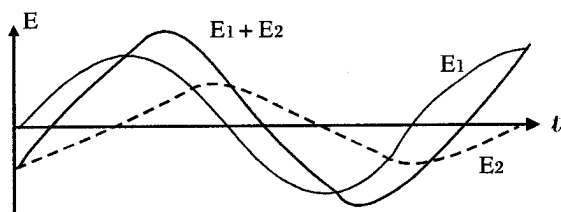


图6—5电波的干涉

各路径的有关参数是不恒定的, 使得合成信号发生时强时弱的不规则变化, 这种现象称为“衰落现象”。由于它是由多径传播引起的, 故又称为“多径效应”。

(六) 电波的吸收 电波在某一媒质中或媒质的交界面传播时, 电波的一部分能量转换为其它形式的能量, 使得电波的能量减少, 称为媒质对电波的吸收。例如, 电波进入电离层后, 电波使电离层中的自由电子作强迫振动, 自由电子和电离层中的其它粒子相碰撞, 化作

热能, 这种能量是由电波提供的, 因而使电波的能量不断地减少。媒质对电波的吸收与媒质的性质及电波的频率等因素有关。

§ 6—2 地波传播与地波天线

一、影响地波损耗的因素

电波沿地表面传播时, 它要在地内产生感应电流, 由于大地不是理想的导体, 所以感应电流在地内流动要消耗能量、使得电波的部分能量被地面吸收, 也就是说电波的能量受到损耗, 影响地波损耗的因素有:

(一) 大地的导电性能愈好, 电波的传播损耗愈小, 通信距离愈远。海水比陆地导电性能好, 潮湿, 沼泽地带比干燥、沙漠地导电性能好, 所以在海上或沼泽地区比陆上及沙漠地区, 在发射功率、天线架设等相同条件下, 通信距离要远些。

据实验、某直立天线辐射功率 1000 瓦, 频率 1 兆赫, 保持接收点的场强为 50 微伏/米, 则在不同地质情况下的通信距离为:

海洋——650 公里

湿地——210 公里

干地——95 公里

(二) 工作频率愈低, 传播损耗愈小, 通信距离愈远。因为工作频率愈高, 感应的地电流愈朝向地表面流动: 致使地电阻增大, 损耗增大。

按上述同样条件实验, 传播路径地质为干地, 则在不同的工作频率情况下通信距离为

150 千赫——670 公里

1000 千赫——95 公里

5000 千赫——22 公里

因而地波传播方式主要用于中波和长波通信, 国内广播、导航、岸对远洋舰艇通信等。

(三) 地波绕过障碍物时, 会产生绕射损失。电波波长与障碍物的尺寸比值愈大, 则绕射能力愈强, 损失愈小。

(四) 地波损耗和发射天线的型式有关。发射天线采用垂直架设的直立天线时, 电波中的电场分量和地面垂直, 称为垂直极化波。垂直极化波在沿地面传播时, 感应的地电流较小, 因此传播损耗小, 通信距离远。所以广播电台都采用架设很高的直立天线。

二、地波通信的特点

(一) 信号稳定 因地波是沿地表面传播的, 而地表面的电性能及地形、地物基本上不随时间、季节和气候条件而变化, 因而信号稳定, 工作可靠。

(二) 地波通信主要适用于设备功率大、频率较低的中、长波固定台工作。短波电台的低端可以用地波通信, 但通信距离较近。超短波和微波电台, 因其频率太高, 地波迅速被衰减掉, 无法用地波通信。

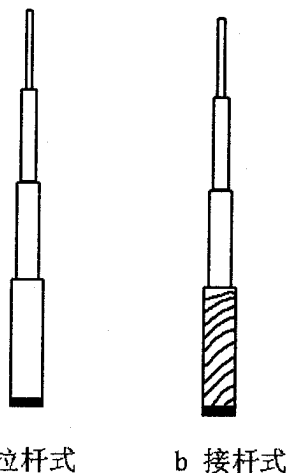


图 6—6 鞭状天线

(三) 根据理论计算,若保持其他条件和接收点的场强一定,发射机功率近似和距离的4次方成正比,因而想用加大发射功率的办法来增加通信距离,其效果是不明显的。

三、地波天线

地波天线通常采用以发射垂直极化波为主的直立天线。对于中小型移动电台来说,一般是用插接式轻便天线,称为鞭状天线,如图6—6所示。鞭状天线的具体结构型式很多,有拉杆式、接杆式,还有蛇骨式以及可弯曲的蛇皮管式等等。

当鞭状天线的长度等于或小于 $\lambda/4$ 时,天线上的电流分布及其辐射的立体方向图,如图9—7所示,可以看出,鞭状天线在水平平面是没有方向性的,即以天线为圆心,在水平平面向各方向辐射的半径是一样的。在垂直平面内。随着发射仰角(电波发射方向与地面的夹角)的增大,辐射减弱,在与地面成90度的方向,几乎完全没有辐射。因而,鞭状天线是以发射地波为主的无方向性天线。

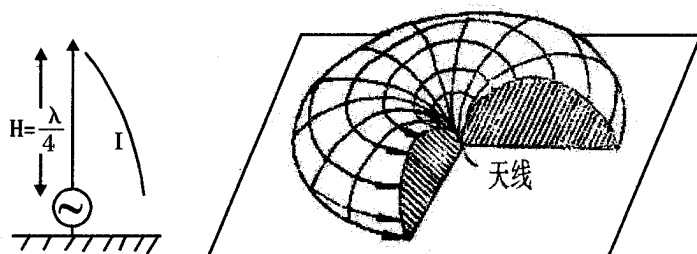


图 6—7 天线的电流分布及其方立体方向图

当直立天线的长度增加时,在垂直平面的辐射方向图要发生变化,图6—8是不同的长度 H 与 λ 比值时,直立天线在垂直平面的方向图。

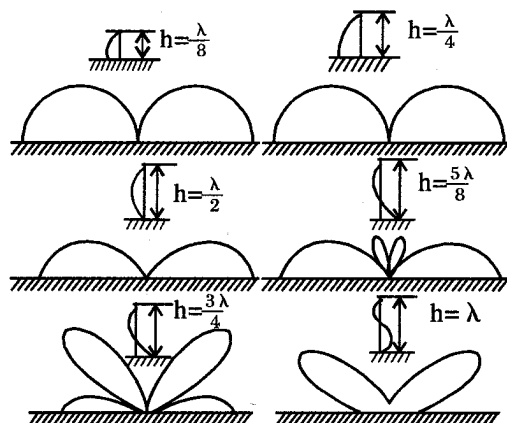


图 6—8 不同 H/λ 的直立天线在垂直平面的方向图

通常,短波电台的鞭形天线,总是小于 $\lambda/4$ 。例如,工作频率为2兆赫时,波长为150米, $\lambda/4$ 则是37.5米,对于小型移动电台来说,这是很难做到的。天线尺寸与波长的比值

愈小，天线上的电流分布愈小，发射效率愈低。为加大天线的有效长度，增大天线电流，提高发射效率，常常在天线的顶端加顶负载，如加辐射叶等。也有的在天上串接电感线圈，如图 6—9 所示。

为了减小接地电阻，提高辐射效率，利用地波传播的电台在固定使用时，最好设置地网，如图 6—10 所示。它是用几根铺地的导线组成，并和电台的地端即外壳相连接。

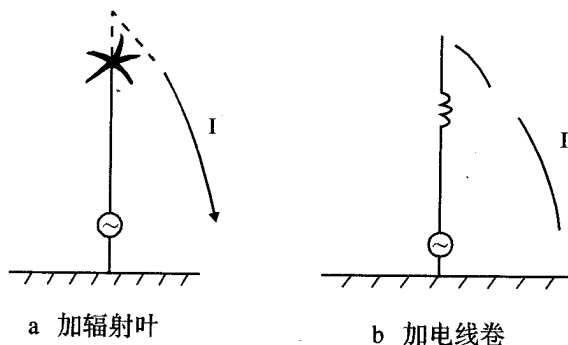


图 6—9 增加天线有效长度的方法

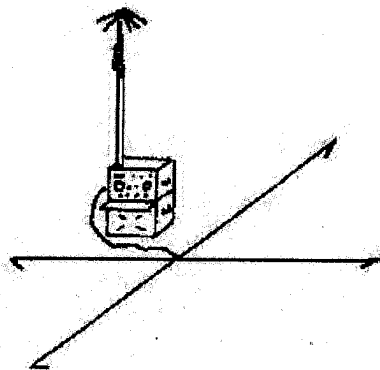


图6—10 电台设置的地网

常用的地波天线，除鞭状天线，高架直立天线外，还有 T 形天线(见图 6—11)及倒 L 形天线(见图 6—12)等。前者实际上相当于直立天线加顶负载，延长了天线有效长度，但只适于固定台站使用。后者则有方向性，以水平部分指向的反方向发射最强，而且既发射地波，又发射天波，当水平部分 l 较短时，仍以发射地波为主。

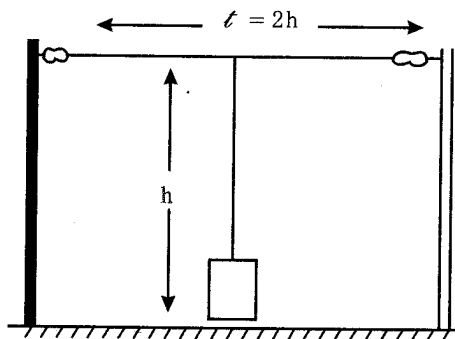


图 6—11 T 形天线

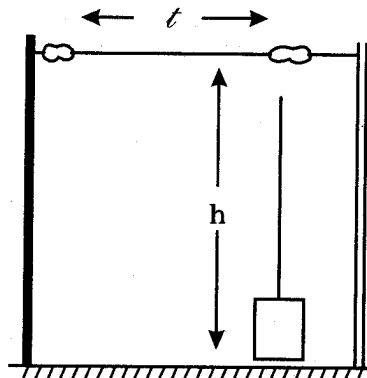


图 6—12 倒L形天线

(未完待续)

本篇文章由赵辉/BD6RA 编辑

无线电通信基本原理

编者按：本教材是北京市无线电管理委员会（现北京市无线电管理局）在 1988 年编印的。全部内容共分八章，简明扼要、深入浅出地阐述了无线电通信的概念、电磁波基本知识、收发信机的组成，电波传播以及干扰等无线电基础知识，曾被北京市无线电管理委员会作为培训北京市各机关、企、事业单位通信管理人员的专用教材。《业余无线电家》将陆续刊登该教材的部分内容，供广大无线电爱好者自学、参考。（接上期，连载五）

§ 6—3 天波传播与天波天线

一、电离层及其变化规律

天波是向高空发射，经电离层反射而返回地面的电波，因而研究天波的传播特点，必须首先对电离层有所认识。

地球表面的大气层按照它的物理特性，一般分为对流层、同温层和电离层，如图 6—13 所示。

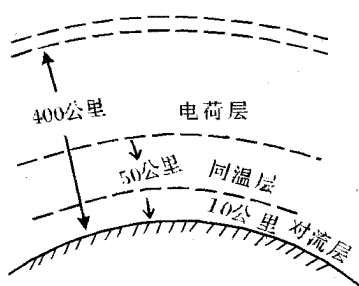


图 6—13 大气层的分层结构

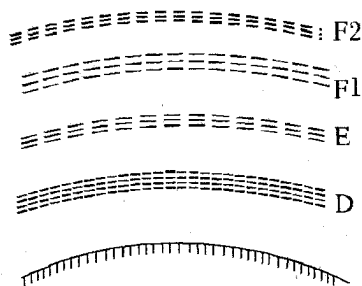


图 6—14 电离层的结构

离地面 10 公里以内的空气层称为对流层。一切刮风、下雨、下雪、打雷等现象都是在对流层发生，它一般只对直射波传播有影响。

离地面约 10—50 公里的空间，称为同温层，气体对流现象减小，它对电波传播基本上没有影响。

离地面约 50—400 公里的高空称为电离层，这层大气主要在太阳的紫外线等的强烈照射下，使气体电离，而形成自由电子和离子，这样由于气体分子被电离而形成了电离层。

处于高空的气体分子，由于本身的重量不同而分层。较轻的处于上层，它首先受到紫外线的照射，所以电离比较强烈。较重的处于低层，由于紫外线已被强烈吸收，所以低层电离较弱。由于分层的原因，电离层一般分为 F 层（又分为 F1 与 F2 层）、E 层、D 层，其中 F2 层最高，D 层最低，F2 层电离最强，D 层电离最弱，如图 6—14 所示。

电离的强弱，用电子密度 N 表示，各电离层的电子密度分布规律如图 6—15 所示。

电离层的电子密度是很不稳定的，它随昼夜、季节、地区纬度及太阳黑子数等因素变化。一般来说，白天较夜晚、夏季较冬季，靠近赤道地区较远离赤道地区、太阳黑子多的年份较太阳黑子少的年份电子密度大。此外，还有许多不规则地变化，例如，当太阳发生耀斑时，会引起电离层的突然骚扰，使通信中断。

二、天波的传播特点

(一) 电离层对电波的反射作用 电离层对电波的反射作用, 与下列因素有关:

1. 电波的频率愈低, 愈易反射。一般长波、中波、短波可以被电离层反射, 超短波、微波则能穿透电离层, 而不返回地面。

2. 电子密度愈大, 愈易反射。电子密度最大的 F 层, 对电波的反射能力最强。通常, 短波通信主要靠 F 层反射(距地面平均高度约 300 公里), E 层可以反射中波, D 层只能反射频率更低一些的电波。各层对电波的反射情况比较如图 6—16 所示。

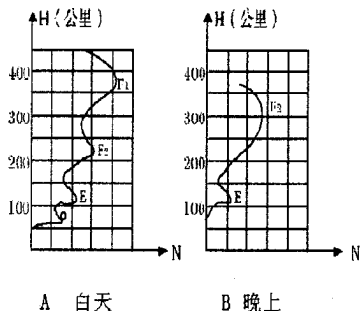


图 6—15 电离层电子密度分布



图 6—16 不同电子密度对电波的反射

从确保电波能够反射来看, 工作频率低一些较适宜, 若某一频率以下的电波, 均能被电离层反射, 那么在这一频率以下的波段都可以选用, 因此将刚能被电离层反射回来的最高频率, 叫做最高可用频率, 高于最高可用频率的电波, 将穿透电离层, 而不能用来实施天波通信。

(二) 电离层对电波有吸收作用

当电波传到电离层后, 电离层内的自由电子受到电波的作用而产生运动, 运动着的自由电子与中性分子发生碰撞, 要消耗能量, 这个能量是电波供给的。这种现象称为电离层对电波的吸收。

电离层对电波吸收作用的大小主要决定于电子密度和工作频率。当工作频率越低和电子密度越大时, 吸收作用也就越大。因此从昼夜来说, 白天比夜间吸收大, 从季节来说, 夏季比冬季吸收大。

为了减小电离层对电波的吸收, 工作频率不宜过低。在保证接收点必要的场强条件下, 电波的频率不能低于某一数值, 这时所选用的最低频率叫做最低可用频率。显然, 工作频率不能低于最低可用频率。

三、选用频率的原则

从上面的讨论可知, 电离层对电波有反射和吸收的双重作用。从选用频率的观点来看两者是有矛盾的。研究天波传播的目的也就在于根据对立统一的规律, 找出正确选用工作频率的原则, 以便指导工作。

选用频率的前提是在确保反射的情况下, 尽可能减小电离层对电波的吸收。也就是说, 选用的工作频率既不能超过最高可用频率, 又不能低于最低可用频率, 在这个频率范围内应尽量把工作频率选得接近于最高可用频率。

根据实践经验, 工作频率等于最高可用频率的 80~90% 比较合适, 这个频率称为最佳工作频率。

由于最高可用频率, 最佳工作频率是随时间、地区, 季节和通信距离的不同而变化的。因此我们在组织通信联络时, 就不能不考虑这些变化的情况, 进行妥善的分配频率和更换频率, 如果使用的频率是上级规定的, 除了按照上级直接规定的频率使用外, 必须在上级规定的频率范围内, 根据昼夜、地区、季节和通信距离的不同, 选用适当的备用频率。一般的说, 在夏季, 南方、白天, 应选用较高的工作频率, 在冬季、北方, 夜间, 应选用较低的工作频率。

天波通信的最佳工作频率, 过去是由有关科研部门, 根据两地间电波反射中点的纬度、太阳黑子数、月

份、时间等进行预测,向有关业务部门通报,供其选用。这种预测是很不准确的,有很多随机因素难以事先都考虑周到,因而短波通信由于可靠性差,一度受到人们的冷落。由于电子技术特别是微计算机的广泛应用,现在短波通信可以配上实时选频系统,及时探测和选用最佳工作频率,确保通信稳定可靠,使短波通信又重新受到人们重视。

四、天波通信的特点

天波通信主要用于短波段,通常所说的短波通信也就是指利用天波进行的通信。其特点是:

(一) 天波通信由于利用电离层反射,可以用较小的功率实现远距离通信。例如 150 瓦短波电台,使用 64 公尺双极天线时,通信距离可 1000 公里。

(二) 要随昼夜,季节更换工作频率,给工作带来不便。

(三) 由于电离层的参数是不稳定的,造成信号不稳定。特别是由于多径效应而产生的衰落现象和多径时延,不仅使信号忽强忽弱、失真,尤其是对数字传输会引起码元畸变,误码率增大等危害。

(四) 短波通信有时会出现“静区”。如图 6—17,地波由于地面吸收,传播距离不远,天波则由于发射仰角小,反射距离远,使得离发射台一定距离内的圆带形地区,成为静区。在此区内,收音机收不到信号。

当然,上述一些缺点是可以采用相应的技术措施来克服或减轻的。例如,采用自动增益控制电路或分集接收办法来克服衰落现象,采用高射天线来克服越距现象,消除静区,以及前面提到的,采用实时选频系统来选择最佳工作频率等。因而,短波通信,特别是作为远距离通信,仍然有其生命力。

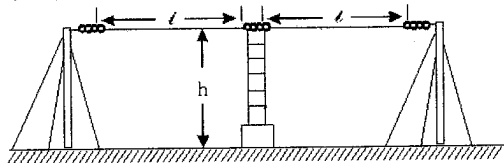


图 6—18 双极天线

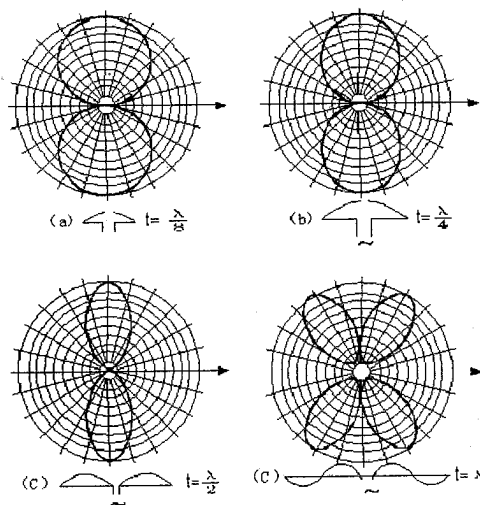


图 6—19 对称振子水平平面方向图

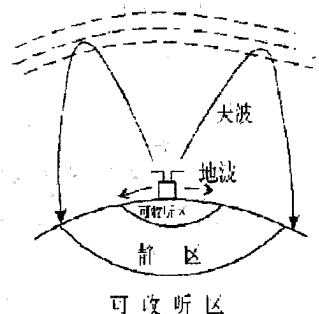


图 6—17 静区

五、天波天线

短波天线最常用的是水平架设的双极天线,如图 6—18 所示。水部分为发射振子,垂直部分为馈线,水平部分每臂的长度为 l ,通常选取 $l = \lambda / 4$,水平部分总长度为 $\lambda / 2$,所以又叫做半波对称振子。

双极天线具有以下特性:

1. 在水平平面的方向性,和水平部分每臂长度 l 与工作波长的比值有关。当 $l \leq 0.625 \lambda$ 时,在水平平面的发射场强是以垂直两臂的方向性最强,如图 6—19 所示。当 $l > 0.625 \lambda$ 时,发射最强方向有变动,出现多瓣的复杂图形。双极天线以发射天波为主,通常在短波段工作,每臂的长度一般不会超过 $\lambda / 2$ 。例如,在 5 兆赫工作时,波长为 60 米,要求 $l = \lambda / 4$ 时,每臂的长度应是 15 米,双臂长 30 米,这已经是够长的了。

2. 垂直平面的方向性,和天线架设的高度 h 与工作波长的比值有关。当 $h \leq 0.625 \lambda$ 时,天线架设愈高,电波最强方向的发射仰角愈低,通信距离愈远,如图 6—20 所示。当 $h > 0.625 \lambda$ 时,电波在垂直平面的发射最强方向,也出现多瓣的复杂图形。图中实线为理想导电地的方向图,虚

线为潮湿地的方向图，点划线为干燥地的方向图。

3. 当天线架设高度 $h < 0.3\lambda$ 时，电波在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 方向辐射最强，经电离层反射后，犹如喷泉洒向地面，在 $0 \sim 300$ 公里范围内无明显的方向性。这种双极天线，称为高射天线。采用高射天线可以克服越距现象。

其它常用的天波天线，还有笼形天线(图 6—21)、菱形天线(图 6—22)等。前者的特性与一般双极天线相似，只是特性阻抗低，便于和馈线匹配；后者是末端接有吸收电阻的行波天线，具有高增益、宽频带等优点。这两种天线都是结构复杂、架设不便，只适于大型固定台使用。

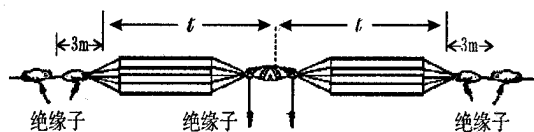


图6—21 笼形天线

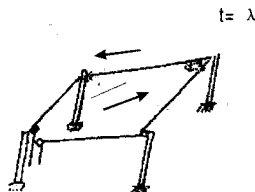


图 6—22 菱形天线

§ 6—4 直射波传播及其天线

一、直射波的传播特点

工作频率在 30 兆赫以上即波长在 10 米以下的电波，由于其频率高，向高空发射时，会穿透电离层，而不返回地面，沿地表面传播时，则由于地表面的吸收作用，能量迅速衰耗，传播不远。因而，这种电波主要靠直射波传播。城市移动通信，一般工作于甚高频 (VHF) 及特高频 (UHF) 段，其电波就属于这个范畴。

直射波传播有以下一些特点：

(一) 在地面上的通信距离通常在视距以内。一般电台的天线不可能架得很高，而地球表面又是弧面，因而直射波的通信距离是有限的，通常只能达 $30 \sim 50$ 公里的视距范围。

如图 6—23，设发射天线的高度为 h_1 米，接收天线的高度为 h_2 米，地球的半径为 a_0 (6370 公里)，则根据计算，直射波的通信距离为：

$$D = \sqrt{2a_0} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$$

$$= 3.57 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \text{ 公里}$$

上式中 h_1 、 h_2 的单位为米。

由于空气本身也不是均匀媒质，电波在空气中传播也会因折射而弯曲，使得实际通信距离有所增加。这样，把大气的折射因素考虑进去，两点间的视通距离 D 的计算方法可修正如下：

$$D = 4.12 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \text{ 公里}$$

如图 6—24，各条路径电波的行程不同，到达接收点的相位不同，有的可能同相，使信号增强，有的可能反相，使信号减弱。而各路径的有关参数又常是随机变化的，使得信号时强时弱，称为衰落现象。衰落深度可达数十分贝，对通信极为不利。

超短波和微波由于其波长甚短，在相距很近的两接收点上，其信号强度可能有很大的差别，如图 6—25。例如，在某一接收点，来自不同路径的两电波的相位可能反相，信号很弱，而将接收机移动一个位置后，两电波的相位可能正好是同相，信号增强。由于空间的多径效应，在不同距离上接收点的场强呈波动变化。因

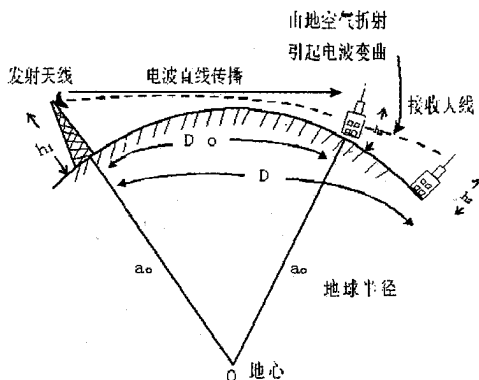


图 6—23 直射波通信距离

而用超短波电台通信时,如发现信号不好,微移动电台的位置,可能有很大的改善。

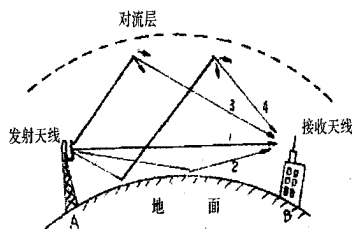


图 6-24 多径传输

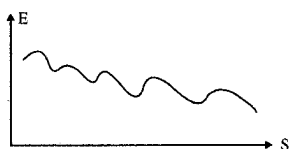


图 6-25 场强与距离关系

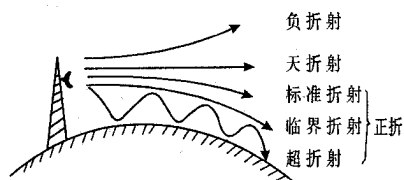


图 6-26 大气折射

汽车移动电台,由于它和基地台的距离及方位在不断地变化,信号的强弱变化更是迅速剧烈,需要采取相应措施予以解决。

(三) 受地形地物的影响大

超短波特别是微波,由于其波长短,基本上是沿直线传播,绕射能力很差。在传播中遇到建筑物、树林、山丘等导体介质,一方面要产生反射或散射,改变电波传播方向,一方面要在其中产生感应电流,损耗能量。反射和吸收均与频率有关,频率愈高,障碍物的影响愈大,吸收也愈剧烈。因此,在进行超短波和微波地面通信时,应避开高大建筑物,选择开阔的地形,将天线架高。

(四) 大气折射和吸收的影响 大气折射使电波射线弯曲,但在不同的折射条件下,电波射线的弯曲是不一样的,如图 6-26 所示。负折射是指电波射线下凹,对地面的通信极为不利。在高纬度海岸地区的冬天,又湿又冷的情况下,有可能产生负折射。无折射是指电波按直线传播,不发生弯曲,这是设想大气层为理想的均匀媒质的情况。标准折射是在标准对流层内产生的折射,这时对流层内空气混合得十分均匀,在阴天和有风的天气常会出现这种折射。前面讲到的考虑大气折射条件下的计算视通距离公式,就是按标准折射条件下求出的。临界折射是指电波射线的曲率半径与地球相同,电波射线的轨迹与地面平行。超折射是指在地面和超折射界面之间,形成大气波导,电波在波导内来回反射,向远方传播。夏天雨后初晴的稳定天气,常会发生超折射现象。标准折射、临界折射和超折射,称为正折射,它们可使实际通信距离大于视线距离。

大气的折射程度与气候,湿度和水气等因素有关,而这些因素都是变化的,它们的变化导致折射情况的变化,使得信号的传输损耗不恒定。

大气对超短波和微波除产生折射外,还有吸收作用,波长愈短,吸收愈严重。此外,雨、雪、雾等对电波也有吸收作用。

(五) 超短波和微波受天电干扰小,同时,它主要是靠直射波传播,较之天波通信,信号较稳定。

二、直射波天线

超短波和微波电台由于其波长短,天线的尺寸可以较小,易于做成高增益的定向天线。象用于微波接力 and 卫星通信以及两定点间的专向通信,都应使用高增益的定向天线。但对于移动台以及处在服务区中心位置的基地台来说,则应使用无方向性的全向天线。下面分别介绍几种常用的直射波天线。

(一) 引向天线

引向天线又称八木天线,是由一个有源半波振子和多个无源辅助振子组成的定向天线,如图 6-27 所示。有源振子又称主振子,可以是半波对称振子、也可以是折合振子。前者是指主振子是开路的两臂,两臂的长度为 $\lambda/2$,其输入阻抗较低,一般用特性阻抗为 50 欧姆或 75 欧姆的同轴电缆馈电,后者是指主振子末端折合,成短路状,其输入阻抗较高,一般用特性阻抗为 300 欧姆的扁平双导线馈电。装在无源振子后面的无源振子叫反射器,比有源振子的两臂长度稍长一点,即略大于 $\lambda/2$ 。装在有源振子前面的无源振子叫引向

器，略小于 $\lambda/2$ ，并依次减小。无源振子同有源振子及馈线没有直接的电联系，各振子间的距离为 $\lambda/4$ ，它们对有源振子辐射的电波起反射和引向作用，使电波集中向前辐射。

有时将两副引向天线，相互垂直地组合在一起，使其既可发射垂直极化波，又可发射水平极化波。

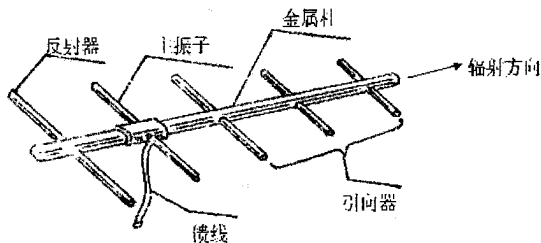


图 6-27 引向天线

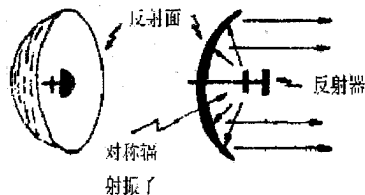


图 6-28 抛物面天线

（二）抛物面天线

抛物面天线是由金属抛物面反射器和位于抛物面焦点上的对称辐射振子以及金属圆盘反射器组成，如图 6—28 所示。金属圆盘反射器与辐射振子的距离为 $\lambda/4$ 。由于抛物面反射器能将辐射振子发射的电波变成一束互相平行的电波向前发射，使这种天线具有很强的方向性。

上述两种定向天线，广泛用于微波、超短波接力通信及电视接收等固定通信场所，必须将天线对准通信方向，否则，信号就明显减弱，甚至根本收不到信号。

（三）卡塞格伦天线

是一种双反射镜式的微波天线，用于卫星通信地球站，它的外形和一般抛物面天线相似，图 6—29 是其示意图。来自发射机的微波电能经馈源喇叭投向副反射体，经副反射体反射到主反射面，成为平行的波束射向卫星。天线尺寸越大，聚束能力愈强，增益愈高，常见的固定站的天线直径有 30 米、10 米等。

卫星天线通常设有跟踪伺服设备，不断地自动调整天线的角度，使其始终对准卫星。

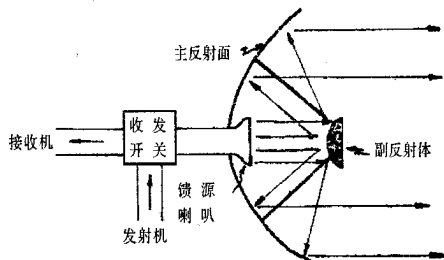


图 6-29 卡塞格伦天线

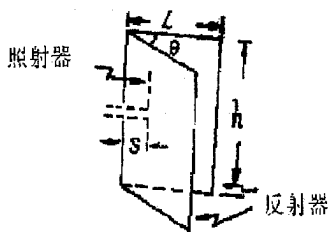


图 6-30 角形天线

（四）角形天线

角形天线是由两个平板反射器和在板间的线形照射器组成的，如图 6—30 所示。照射器可以是单元振子也可以是多振子组合而成。适当选择两反射器的夹角及振子轴至角顶的距 S ，使直射波信号和反射波信号相互叠加、其最大辐射方向在夹角的等分线上。

一般要求反射器的宽度 L 应不小于工作波长 λ ，反射器的高度 h 则应比 L 大一些。当工作波长较长，要求反射器的尺寸较大时，角形反射器的表面可以用栅状线做成，这样可以减小风阻和降低整体的重量，只要线间的距离与工作波长小得多（小于 $\lambda/10$ ），线条与馈电振子的长度方向平行，则栅状线的反射作用与金属

板表面几乎一样。

(五) 鞭状天线及中馈鞭状天线

鞭状天线是移动式电台特别是手持式无线电话机应用最多的一种全方向性天线。由于超短波及微波的波长很短，天线的尺寸很容易达到要求的数值，有时为了延长天线有效长度，

采用在中部加电感线圈的办法，以提高发射效率。鞭状天线通常制成可以弯曲、外有橡皮防护套直接插接在手持机的顶部，也有采用磁钢制成的底座，可以吸附在车体上。

大多数鞭状天线是由底端馈电，具有结构简单，轻便牢固及使用方便等优点。但由于底端馈电，天线的输入阻抗易受客观环境改变的影响，如工作人员与电台的相对位置变化，都会影响天线的调谐和匹配。而且当鞭状天线为 $\lambda/4$ 时，底端是电流最大点，与车体或周围环境耦合强，损耗一部分能量。为了克服上述缺点，近来研制了一种中部馈电的鞭状天线，叫中馈鞭状天线。

中馈鞭状天线的外形如同一个普通鞭状天线，它是由鞭杆和组合底部装置两大部分组成。鞭杆有上下两节，装在一个玻璃钢的套管中，其

内部结构见图 6—31。中馈鞭状天线实际上是一个垂直对称振子，其馈电点在靠近天线中点处，馈电点上部（鞭杆的上节）是一根单导体，作为上辐射体，馈电点的下部为同轴电缆，其芯线连接于鞭杆上节的单导体上。由于同轴电缆的内导体与外导体壁上的电流大小相等，方向相反，如图 6—32 所示，即 $I_1 = -I_2$ ，而外导体是开口的，故 I_2 沿内壁从开口处流向壁（形成电流 I_3 ），如果略去其它漏电流，则 $I_3 = -I_2 = I_1$ ， I_3 沿同轴电缆外导体的外壁到地，所以同轴电缆的外导体就成了下辐射体，为垂直对称振子的另一臂即鞭子的下节（内导体和外导体内壁因 $I_1 = -I_2$ ，它们所形成的辐射场互相抵消）。

组合底部装置部分由支撑鞭子的钢弹簧、底座（内有电缆电感线圈）及金属罩（罩内装有电抗器和阻抗匹配器的元件及波段连动开关等构件）几部分构成。钢弹簧的采用使鞭杆遇到障碍时能弯曲。底座一方面作为鞭杆与车体的连接器，另一方面又是鞭杆部分与地（车体）之间的绝缘子。底座中的电感线圈是由馈电的同轴电缆绕在一个高导磁率的铁氧体圆棒上形成的，它的一端连接于鞭杆下端的同轴电缆上（内导体相接，外导体接电抗器的分流元件），另一端其外导体接地，内导体连接在阻抗匹配网络上，阻抗匹配网络又接于来自发射机的同轴电缆的内导体上。

通常中馈鞭状天线的馈杆全长取为 左右，其电流分布与向图如图 6-32 所示。

由于中馈半波鞭状天线的电流分布与半波对称振子相似，其电流波腹即电流最大点在馈电点附近，而顶端和底部均为电流波节即电流最小点，从而减小了车体及环境对天线的影 响，因而改善了匹配，提高了发射效率，在相同条件下，使用中馈天线比底馈鞭状天线的通信距离要远些。

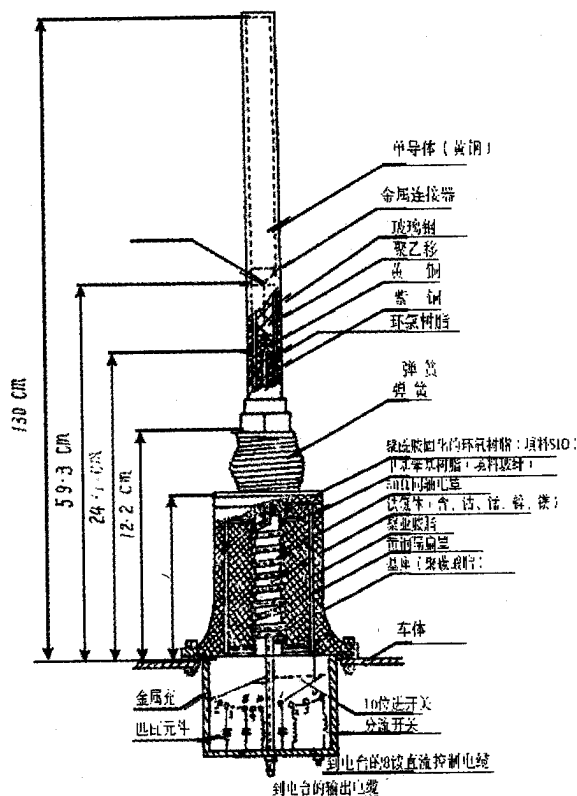


图 6—31 中心馈电鞭状天线

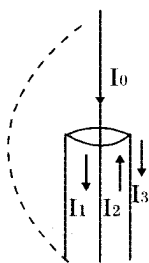
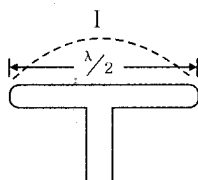


图 6—32 中馈鞭状天线的电流分布



单元折合振子天线

图 6—33 折合振子天线

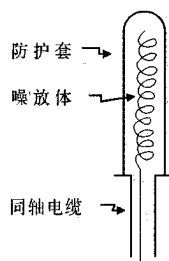


图 6—34 螺旋天线

(六) 多层折合振子天线

单元折合振子就是将对称振子的末端折合连接起来，其长度为 $\lambda/2$ ，如图 6-33 所示。折合振子的辐射特性与一般半波对称振子相似，但其频率特性较好，输入阻抗较高，可以用扁平双导线馈电在基地台可以用垂直排列的多层折合振子天线，采用四层折合振子间隔为 λ 或 $\lambda/2$ 同相馈电，可以得到水平平面为圆形的全向辐射图。

(七) 螺旋天线

螺旋天线是由良导体金属线或薄金属带制成螺旋状天线，外部用玻璃钢做成防护套，起保护作用，如图 6—34 所示。螺旋天线的频带较宽，通常用同轴电缆馈电，同轴线的内导体和螺旋线的一端相连，外导体和金属栅网状的接地板相接。当螺旋的直径 D 与工作波长 λ 之比为 $0.25 \sim 0.46$ 时，沿螺旋轴线方向辐射最强，辐射场是圆极化波。当螺旋直径 D 与工作波长 λ 之比很小时(小于 0.18)，在垂直于螺旋轴线的平面上有最大的辐射，并且在此平面上可得到圆形对称的方向图。

§ 6—5 天线的主要参数及架设要求

一、天线的主要参数

(一) 输入阻抗

天线输入端所呈现的等效阻抗，以 Z_A 表示，它等于天线输入端高频电压 U_A 与高频电流 i_A 的比值，即

$$Z_A = \frac{U_A}{I_A} = R_A + jX_A$$

式中， R_A 为天线输入阻抗的有功分量即电阻部分， X_A 为天线输入阻抗的无功分量即电抗部分。

天线的输入阻抗是随天线长度及工作频率不同而变化的。在实际使用中，我们总是希望天线输入阻抗随频率变化愈小愈好。这样，就可以在一定的宽的工作频带内，满足天线与馈线的匹配要求，才能以高效率将发射机产生的高频功率输送给天线。

当天线的输入阻抗较低时，则输入阻抗随频率变化小，天线的工作频带就会宽。所以我们常用降低天线输入阻抗的方法来加宽天线的频带。在很多情况下，则在发射机的输出电路和接收机的输入电路中，加装阻抗匹配的网络，使其与天线阻抗相匹配。

(二) 天线效率

指天线辐射功率 P_e 与由发射机输入到天线上总功率 P_a 之比，以 η_A 表示，即

$$n_A = \frac{P_e}{P_A} = \frac{R_e}{R_A}$$

式中, R_e 是天线辐射电阻, R_A 则是天线上总的输入电阻, 包括辐射电阻及各种损耗电阻。由于各种损耗电阻的存在, 使得送入天线的高频电能只能有一部分转换为电磁能辐射出去。天线采用导电性能良好的导体、架设天线时所用的绝缘物质要绝缘性能良好、天线尽量避开周围的导体, 都可减少损耗, 提高辐射效率。

(三) 天线的方向系数

天线的方向性是指天线向一定方向辐射或接收电磁波的能力。天线的方向性常用方向系数 D 来表示, 它的定义是: 在接收点产生相等电场强度的条件下, 采用无方向性天线需要的辐射功率 P_{eo} 与采用有方向性天线需要的辐射功率 P_e 之比值, 一般用分贝表示, 即

$$D(\text{db}) = 10 \log \frac{P_{eo}}{P_e}$$

如某两点间通信, 为使接收点达到额定的电场强度, 使用无方向性天线时, 需要发射机的辐射功率为 4 瓦, 如使用定向天线, 则只需 1 瓦的辐射功率就够了, 则此定向天线的方向系数为:

$$D(\text{db}) = 10 \log \frac{4}{1} = 6 \text{ 分贝}$$

(四) 天线的增益

在天线最大辐射方向上某点产生相等场强的条件下, 无损耗的全向天线的输入功率 P_{Ao} 与某天线输入功率 P_A 之比, 称为该天线的增益系数, 以 G 表示。由于天线无损耗时, 输入功率也就等于辐射功率, 则

$$G = \frac{P_{Ao}}{P_A} = \frac{P_{eo}}{P_A} = \frac{P_e}{P_A} \cdot \frac{P_{eo}}{P_e} = n_A D$$

即天线的增益系数等于其天线效率与其方向性系数的乘积, 通常也用分贝表示。一般半波对称振子的天线增益为 2.2 分贝。实用下, 常以 $\lambda/4$ 的全向性天线作为零分贝, 因而某些长度大于 $\lambda/4$ 的全向天线, 也具有一定的增益。

(五) 天线的频率特性

无线电台通常是在一定宽度的频段内工作, 天线的尺寸则难以随之变化。当工作频率变化时, 天线的输入阻抗, 方向图, 方向系数, 增益等都会随之改变。天线的频率特性, 通称天线的通频带, 是指保持天线的特性参数在允许值内变化时的频率范围。

通常取天线最大辐射功率为 100%, 在两侧各下降 3 分贝的频率范围, 叫天线的通频带。显然, 天线的通频带愈宽, 则电台的允许频率范围愈宽, 或能提供的信道数可以愈多。

因为收、发天线是可逆的, 即同一付天线, 既可作发射天线, 又可作接收天线, 而且其电性能是相同的。因而, 上述天线参数的讨论, 对发射机和接收机都是适用的。

二、天线共用器

当收、发信机合用一付天线而要求双工工作时, 或几部发射机(接收机)共用一付天线时, 就需要设置天线共用器, 保证各自正常工作, 而又互不影响, 或使相互影响减小到允许的程度。

(一) 收发天线共用器

无线电通信作双工运用时, 不仅收、发频率应有足够的间隔, 而且收、发天线也应保持足够的距离。否则, 发射机工作时对本台接收机有很大的干扰, 即使频率不同, 但因其功率大、距离近, 会对接收机造成多种干扰或产生阻塞现象, 严重时会使接收机因过荷而受到损坏。对于小型台特别是对于移动台来说, 要求收

发天线分开架设是难以实现的，一般用收发天线共用器(又叫双工器)来解决。

图 6—35 是某种收发天线共用器的示意图，天线到收发信机之间，接有不同频率特性的滤波器，滤波器 I 可以通过发信频率 f_T 而阻止收信频率 f_R ，滤波器 II 则正好相反。这样，由发射机输出的频率为 f_T 的高频电能，只能通过滤波器 I 进入天线，而不能通过滤波器 II 进入接收机；同样，由天线接收的频率为 R 的高频信号，只能通过滤波器 II 进入接收机，而不能通过滤波 I 进入发射机。也就是说，收发信号各行其道，互不影响。

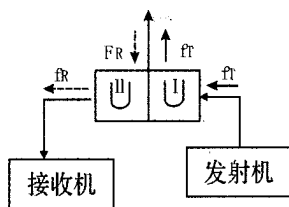


图 6—35 收发天线共用器

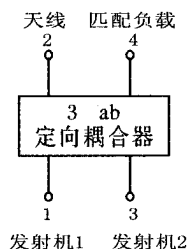


图 6—36 发射天线共用器

(二)发信大线共用器

几台发射机共用一付天线时，就有可能使一台发射机的部分输出功率，经天线返回其它发射机、产生发射机输出互调。对发信天线共用器的要求是：

- 1，对有用信号的传输损耗小；
- 2，共用器的各发射机间的耦合损耗即隔离度要大，也就是各路发射机的带通滤波器对邻道频率的衰减量要足够大；
- 3，体积小，结构简单且工作稳定。

图 6—36 是一种用于发信天线共用的 3d6 定向耦合器，它是一种四端接口器件。其基本特性是：若从 1 端输入射频功率，则 2、4 端各输出功率的一半，3 端无输出；若从 3 输入射频功率，则 2、4 端各输出功率的一半，1 端无输出。

因此，可以利用 1、3 端的隔离特性，分别在 1、3 端各接一台发射机，2、4 两端，一端接发射天线，一端接匹配负载，吸收一半功率。若有更多的发射机要共用天线时，则可用多级 3bd 定向耦合器相接，但每经一级，功率要损耗一半。

其它还有许多种型式的天线共用器，就不一一例举了。

(三)接收天线共用器

收信天线共用器通常由公共放大器和功率分配器组成，如图 6—37 所示。对公共放大器的要求是动态范围要大，线性要好，增益要适当，以减少互调。这里使用两个公共放大器同时工作，是为了保证系统工作可靠，只要其中一个放大器工作，整个系统就不会失效。功率分配器的作用是把高频信号功率均匀地分配给各接收机，同时还要保证各接收机的匹配。带通滤波器则是为抑制带外干扰而设的。

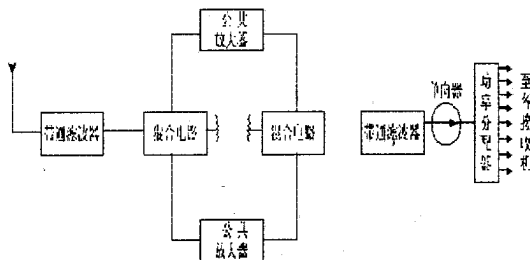


图 6—37 收信天线共用器

总之，收信天线共用器应有适当的增益，应能避免互调干扰，并且不更多地降低接收机的信噪比。

三、天线及电台的架设

(一) 机房与天线位置的选择正确的选择电台的位置, 对于发挥电台效能, 提高无线电通信的稳定性及可靠性, 保证电台的正常工作具有重要的意义。所以应该根据使用设备的技术情况, 制定出适合本单位实际的方案。主要应考虑如下的几个因素:

1. 电台机房的位置, 应利于无线电波的发射与接收, 应尽量避免电波传播的死区和影响电波发射及产生严重干扰的物体。

2. 天线及机房应尽量靠近使用部门或总机房。

3. 应便于架设安装及维修。

4. 超短波电台的有效通信距离与架设天线的高度, 地形及采用天线的型式有关。应根据工程设计确定天线的型式及架设高度。

5. 馈线愈长, 损耗愈大, 所以机房的位置要尽量靠近天线, 馈线的长度最好不超过 50 米并尽可能采用低损耗同轴电缆。

6. 机房内设置应注意下列要求:

(1) 有利于设备通风散热, 各种发热源要尽量分开;

(2) 有利于设备的安装维修及操作方便;

(3) 确保操作人员的安全, 各种设备要有良好的接地, 电源走线要安全合理, 操作台底部可放置 10 毫米左右的绝缘胶板, 或用木质地板。

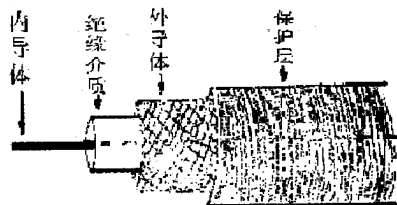


图 6—38 同轴电缆

(二) 馈线的选用

1. 馈线的分类及结构连接接收、发信机与天线的导线, 称为馈线, 又叫传输线。通常分两大类型: 一是平行传输线, 阻抗为 300 欧姆, 多用于电视接收; 二是同轴传输线, 又叫同轴电缆, 阻抗为 50 欧姆、75 欧姆, 超短波及微波电台多用此种馈线。

同轴电缆是由同轴排列的内、外两个导体组成, 如图 6—38。内导体为实芯导线, 外导体为金属网编织而成, 内外导体之间充有高频绝缘物质, 表面附有塑料保护层。

同轴电缆由于外导体的屏蔽作用, 辐射损耗很低, 但存在着内导体的电阻损耗及绝缘材料的介质损耗等。同轴电缆的工作频率可高达数千兆赫。

2. 馈线的特性阻抗当用馈线将发射机和天线相连时, 发射机输出的高频能量沿馈线传输给天线, 由发射机向天线传输的电压及电流波形, 称为电压入射波及电流入射波。我们把馈线上电压入射波与电流入射波之比, 称为馈线的特性阻抗, 以 Z_c 表示。同轴电缆的特性阻抗为

$$Z_c = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{b}{a} \text{ (欧姆)}$$

式中, b 为外导体的内半径, a 为内导体的外半径, ϵ_r 为内外导体间介质的相对介电常数。当馈线末端所接负载即天线的输入阻抗等于馈线的特性阻抗时, 称为阻抗匹配。这时馈线上传输的能量全部被负载吸收, 不产生反射, 我们称馈线上的电压电流波形为行波。当馈线末端所接负载不匹配时, 就要产生能量反射, 即馈线上既有电流、电压入射波, 又有电流、电压反射波, 两者合成的波形叫驻波。馈线上发生驻波时, 各点电流或电压的振幅是不一样的, 我们把驻波电压或电流振幅最大值与最小值之比, 叫驻波系数, 以 S 表示。 S 愈大说明传输线上驻波成分愈大, 即馈线失配严重。当 $S=1$ 时说明阻抗匹配, 馈线上是行波状态, 没有驻波。

为了减小传输损耗, 提高发射效率, 在选用和连接馈线时, 必需注意阻抗匹配和尽量缩短馈线的长度。

(三) 避雷针的安装

由于城市楼房在不断地增高, 通信天线的架设高度也随之上升, 避雷问题就显得非常突出, 而避雷针的安装质量如何, 对保证通信设备及工作人员的安全及通信的可靠性有着重大关系。

1. 架设避雷针的一般技术要求

一船固定台的天线架设高度大都超过附近的最高建筑物, 而天线塔又都是金属材料制成的, 这就自然形成了一个引雷体。根据避雷的一般要求, 架设天线应在避雷的安全角度内, 一般避雷针的保护角为 45° , 如图 6—39 所示, 安装天线必须在避雷针的保护角内, 始可避免或减少雷击的机会。

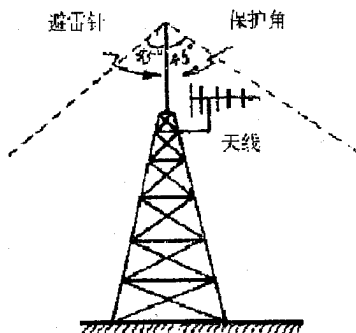


图 6—39 避雷针的保护角

正确安装避雷针的接地线, 是保证避雷针起作用的重要条件, 不论安装任何一种高架天线, 必需有可靠的避雷接地, 才能将线引入工作间, 否则是不允许的。

地线的种类可分为避雷保护接地及各种电器设备的安全接地等。后者是考虑到可能由于绝缘不良等原周, 造成设备外部带电, 危及人身安全, 因而必须有可靠的接地装置。下面着重介绍避雷接地的要求。

2. 避雷接体的选用及制作:

避雷接体的地线, 可以采用自然接地体及人工接地体。在接地电阻能满足要求情况下应尽量采用自然接地体, 这样可以省工省钢材。当自然接地体的接地电阻不能满足要求时, 从安全可靠出发, 就必须采用人工接地体, 即人工制作地线的方法, 以达到很小的接地电阻, 满足接地的要求。制作接地体时要注意几个问题:

- (1) 采用垂直埋入地下的铁管或圆钢, 角钢时, 要求不少于两根;
- (2) 土壤有强裂腐蚀的情况时, 应使用镀铜或镀锌的材料;
- (3) 在遇有多卵石的地区时, 可采用水平埋设方法, 但埋设的材料不少于两根;
- (4) 为了减少外界气候变化对接地电阻的影响, 垂直埋设时, 接地体最高点离地面应不小于 0.6 米, 水平埋设时, 接地体距地面应不小于 0.7~1 米;
- (5) 埋入地下的接地体间的距离, 垂直埋设时, 应不小于 2.5 米, 水平埋设时, 不小于 1.5 米;
- (6) 接地体与楼房或建筑物的距离应不小于 1.5 米, 与烟筒或建筑物避雷针的距离应不小于 3 米;
- (7) 埋入地下的接地体要有一定的强度, 垂直时, 应使用 38~40 毫米、壁厚 3.5 毫米或直径为 8 毫米以上的圆钢, 水平埋设时, 可以使用 $5 \times 50 \times 50$ 毫米的角钢或 12×4 毫米的扁钢等, 每根长度不小于 2.5 米;
- (8) 在埋设时, 经常遇到电阻率很高的沙土、河、石、砂等, 在这种情况下, 埋设接地体时, 就应该采取一些辅助措施, 如增加接地体的根数, 还应在接地体的周围的土壤中加入食盐, 炭粉等物。或在接地体周围更换粘土、黑土及砂质粘土等电阻系数较低的土壤, 以降低接地电阻。

3. 接地体的埋设

根据当地实际情况, 挖一条深 0.8~1 米、宽 0.5 米的沟, 长度可根据接地体的根数而定, 一般约在 15 米左右。然后将接地体打入地中。接地体顶部应露出 100~200 毫米, 以便连接接地线, 然后用扁钢依次将接地体连接起来, 扁钢应侧放不可平直, 经检查无误质量完好后, 可以回填土(在回填土中不应有石头, 建筑碎料及垃圾等), 并分层夯实, 每层都潜水使土壤与接地体相互紧密接触, 当工程完结时, 要进行一次接地电阻的测试, 看是否符合规定指标的要求, 希望接地电阻越小越好。一般要求 $\leq 4 \Omega$, 并要求每年 3、4 月份或土壤最干燥时期进行测试。如果接地电阻不能满足要求时, 需要增加接地体数或对土壤进行处理(灌盐水等)用来减小接地电阻, 使之达到规定的要求。(全文完)

本篇文章由赵辉/BD6RA 编辑