

雷达接收系统

中国人民解放军雷达学校

毛主席语录

列宁为什么说对资产阶级专政，这个问题要搞清楚。这个问题不搞清楚，就会变修正主义。要使全国知道。

思想上政治上的路线正确与否是决定一切的。

教育必须为无产阶级政治服务，必须同生产劳动相结合。

学校一切工作都是为了转变学生的思想。

军队要严格训练，严格要求，才能打仗。

练兵方法，应开展官教兵、兵教官、兵教兵的群众练兵运动。

目 录

第一章 雷达接收机概論

第一节 雷达接收机的组成与性能指标.....	1
一、雷达接收机的组成.....	1
二、雷达接收机的性能指标.....	2
第二节 雷达接收机的杂波系数.....	4
一、杂波的来源及其性质.....	5
二、杂波系数及其计算.....	10
三、杂波系数与灵敏度的测量方法.....	14
第三节 雷达信号的频谱和接收机的通频带.....	17
一、雷达信号的频谱.....	17
二、雷达接收机的通频带.....	19

第二章 电子管低频放大器

第一节 电子管放大器的分析方法.....	21
一、电子管放大器的基本电路与工作原理.....	21
二、放大器直流工作状态的分析方法.....	22
三、放大器交流工作状态的分析方法.....	25
第二节 阻容耦合放大器.....	30
一、阻容耦合放大器的结构特点.....	31
二、阻容耦合放大器的频率特性和相位特性.....	31
三、阻容耦合放大器的频率相位特性曲线和通频带.....	37
四、阻容耦合放大器的高频补偿.....	39
第三节 负回授放大器.....	42
一、负回授放大器的实际电路及其分类.....	42
二、电压负回授放大器的性能分析.....	43
三、电流负回授放大器的性能分析.....	48
四、各种负回授放大器性能的比较.....	50
五、跟随器.....	50

第三章 晶体管低频放大器

一、频率特性曲线.....	55
---------------	----

二、影响低频特性的因素	55
三、影响高频特性的因素	56
四、晶体管的带宽增益积	56
五、增宽通频带的措施	57

第四章 振 荡 回 路

第一节 串联振荡电路	58
一、串联回路的阻抗	58
二、串联谐振	58
三、谐振时回路中的能量关系	60
四、谐振曲线	61
五、通频带	62
第二节 简单并联振荡电路	63
一、谐振频率和谐振阻抗	63
二、谐振时的支路电流	64
三、等效电路	65
四、并联振荡电路的频率特性	66
第三节 复杂并联振荡电路	67
一、一般并联振荡电路的谐振特性	68
二、接入系数与等效电路	69
第四节 互感耦合电路	72
一、等效回路	73
二、耦合振荡电路的谐振	74
三、耦合振荡电路的谐振曲线	78

第五章 电子管中频放大器

第一节 概论	81
一、对中频放大器的主要要求	81
二、中频放大器的类型及其特点	82
第二节 单调谐中频放大器	84
一、单级电路分析	84
二、多级电路分析	92
第三节 参差调谐中频放大器	96
一、两级参差调谐放大器	97
二、多级参差调谐放大器	101
第四节 双调谐中频放大器	102
一、单级电路分析	102
二、多级电路分析	103

第五节 中放特殊级的处理	104
第六节 中频放大器工作的稳定性	105
一、通过电源的回授及其消除	105
二、通过电磁耦合的回授及其消除	107
三、放大器工作不稳定的判断和检查	109
第七节 中频放大器的调整与测试	110
一、调试所用的仪表	110
二、检查和初步调试	110
三、中频放大器指标的测试	111

第六章 晶体管中频放大器

第一节 概说	113
第二节 晶体管的高频特性	113
一、晶体管的电抗效应	113
二、晶体管的等效电路	114
第三节 单调谐中频放大器	118
一、等效电路	119
二、单级电路的分析	122
三、多级电路的分析	125
四、单调谐中频放大器的设计	126
第四节 参差调谐中频放大器	133
一、两级参差调谐放大器	133
二、多级参差调谐放大器	134

第七章 电子管高频放大器

第一节 高频调谐放大器	136
一、共阴放大器	137
二、共栅放大器	140
三、共阴—共栅放大器	143
第二节 行波管放大器	146
一、结构和功用	147
二、行波管的放大原理	147
三、行波管放大器的性能	150

第八章 参量放大器

第一节 可变电容参放的基本概念	152
一、参放的基本概念	152

二、变容二极管	154
第二节 可变电容参放的工作原理	156
一、可变电容参放的等效电路	156
二、可变电容参放的工作原理	157
三、可变电容参放的负阻	160
第三节 可变电容参放的性能分析	163
一、功率放大量	165
二、通频带宽度	166
三、杂波系数	169
第四节 某分米波雷达参放使用中的一个问题	174
第五节 微带参放介绍	175
一、WJC1—10A 型微带参放	175
二、双管平衡微带参放	179
第六节 参放的调整和测试	183

第九章 晶体管高频放大器

一、晶体管高放的放大参数	184
二、晶体管高放的杂波系数	185

第十章 信号的变换

第一节 变频	191
一、变频基本原理	191
二、对变频器的要求	192
三、二极管混频器	194
四、三极管混频器	205
五、混频器的测试	210
第二节 检波	211
一、工作原理	212
二、性能分析	213

第十一章 接收机的功能控制电路

第一节 自动频率微调	218
一、自动频率微调电路的功用与基本组成	218
二、鉴频器	219
三、自频调电路的控制特性和频率跟踪原理	226
四、搜索式自频调电路的工作原理	230
五、自频调电路的假跟踪及其避免方法	234

六、自频调电路的性能测试	326
附录 1	238
附录 2	239
第二节 对数中频放大器	240
一、对数中放的基本特性与分类	240
二、连续检波式对数中放	243
三、脉冲包络负回授对数中放	245
四、双增益级对数中放	248
五、对数中放的调整与测试	251
附录 3	253

第十二章 动 目 标 接 收

第一节 概述	255
一、动目标回波和固定目标回波的差别	255
二、相参法选择动目标的基本原理	257
第二节 相参法选择动目标的分析	258
一、组成和工作概况	259
二、回波脉冲与相参电压之间的相位差	259
三、视频回波脉冲幅度的变化规律,盲速和频闪效应	261
第三节 视频对消电路	264
一、超声波延迟线	264
二、超声波延迟线对消设备的组成	266
第四节 目标回波的频谱和对消设备的频率特性	267
一、理想情况下目标回波的频谱和一次对消设备的频率特性	267
二、实际情况下目标回波的频谱和对对消设备频率特性的要求	270
第五节 动目标选择雷达的相消质量	272
一、雷达有关部件工作不稳定的影响及改进措施	272
二、天线波束扫描的影响	282
三、固定目标回波起伏的影响	282
第六节 动目标选择雷达的目标能见度	283
第七节 动目标接收系统的性能测试	284
一、瞬间频率稳定度的测量	284
二、视频对消系数的测试	288
三、能见度的测试	289

第一章 雷达接收机概论

雷达接收机是雷达机中不可缺少的一个重要组成部分。它的任务，是从接收到的电磁波中选出有用信号（被探测目标的回波等），经过加工变换后送到显示器等其它分机。对于警戒、引导雷达来说，雷达接收机性能的好坏，是决定探测远距离目标能力大小的关键性因素之一。因此做好雷达接收机性能鉴定、性能恢复等工作，保持接收机性能良好，是我们雷达机务保障工作一项经常性的重要内容。

毛主席教导我们：“自然科学是人们争取自由的一种武装”。为了更好地完成机务保障任务，为加强战备，保卫祖国，巩固无产阶级专政服务，我们需要进一步了解雷达接收机的工作原理，熟悉雷达接收机的主要性能，切实掌握雷达接收机性能鉴定、恢复等技能，作为做好我们工作的一个武器。在这方面，为大家提供基本资料，创造自学条件，就是选取本课程内容，编写本教材的出发点。在这一章，我们要介绍一下雷达接收机的组成和性能（技术）指标；重点说明杂波系数（或灵敏度）、通频带等性能指标的意义和测量方法，以便大家对雷达接收机的工作原理和性能有一个总体概念。

第一节 雷达接收机的组成与性能指标

一、雷达接收机的组成

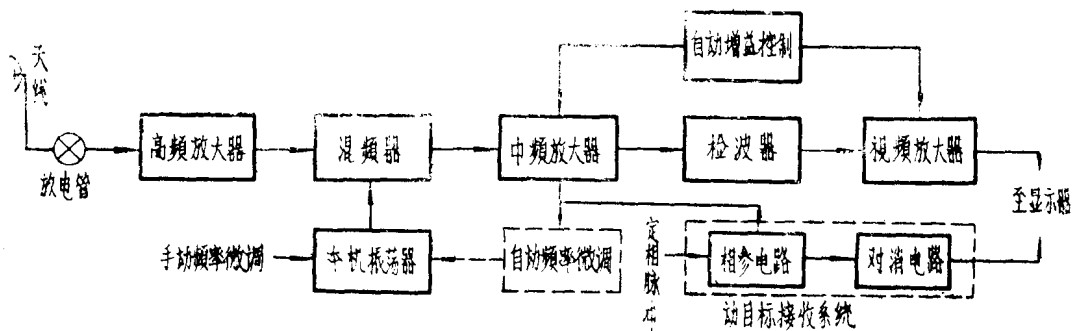


图1—1 典型雷达接收机组成方块图

图1—1示出了典型警戒、引导雷达接收机的组成方块图。它是目前最通用的超外差式电路的典型结构。

雷达接收机的任务，要求解决选择信号，放大信号和变换信号三个问题，由此决定了接收机的基本组成。

从天线接收到的各种电磁波中，选出有用信号，抑制（或滤掉）干扰和杂波的工作，是

由从收发开关到检波器输入端的一系列调谐回路来完成的。

放大信号的工作,分别由高频放大器,中频放大器和视频放大器来完成而以中频放大器为主。因为超外差式接收机的优点,就是把接收到的信号频率降低到一个固定的中频上,以便于制作增益高、频率特性理想的中频放大器,来担当信号放大的绝大部分任务。

信号变换在接收机里包括变频和检波两个内容。变频是把信号频率变低到中频,它由混频器和本机振荡器共同完成。检波或称解调,它和发射机中的调制过程相反,是从高频信号上取出其包络的一种变换过程,由检波器完成。

此外,为了改善接收机的性能,除上述各组成部分外,接收机还有几种辅助性电路,如增益控制电路,频率控制电路,干扰抑制电路等。在我们重点研究的两个典型雷达中,还都有动目标接收系统,它由相参电路和对消电路两大部分组成,是为了消除地物回波等消极干扰,改善雷达的低空探测性能而专门设置的。

二、雷达接收机的性能指标

雷达接收机的性能好坏,主要从以下几个方面来衡量:

1. 灵敏度

雷达接收机的灵敏度用来衡量接收机接收微弱信号的能力,常以最小可辨功率 $P_{\text{信,最小}}$ 表示。所谓最小可辨功率,是指接收机输出端的信号杂波功率比达到正常观察回波所需的最低数值时,天线输送给接收机的最小信号功率 $\star$ 。这一功率的数值越小,说明接收机的灵敏度越高。目前,雷达接收机的灵敏度,一般达 $10^{-12} \sim 10^{-14}$ 瓦。(或者用天线输送给接收机的最小信号电压 $U_{\text{信,最小}}$ 表示, $U_{\text{信,最小}} = \sqrt{P_{\text{信,最小}} R_{\lambda}}$, R_{λ} 为接收机输入端的输入电阻)

把最小可辨功率 $P_{\text{信,最小}}$,代入雷达作用距离方程,可得

$$r_{\text{最大}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{发}} \eta^2 D^2 \lambda^2 \sigma}{P_{\text{信,最小}} (4\pi)^3}}$$

即雷达的最大探测距离 $r_{\text{最大}}$,与接收机灵敏度的四次方根成反比。因此提高接收机灵敏度(减小最小可辨功率)能够使探测距离加大,这和增大发射机功率 $P_{\text{发}}$ 的效果是一样的。例如把接收机灵敏度提高一倍的话,可增大探测距离19%,这和把发射机功率增大一倍的效果一样。可见,提高接收机灵敏度对警戒、引导雷达有很重要的意义。

接收机的灵敏度主要受接收机外来和内部杂波的限制。因为信号和杂波同时被接收机放大,当信号微弱到一定程度,以至被杂波淹没的时候,接收机的放大量再大,也无法将信号从杂波中分辨出来。对于工作在米波~厘米波段的雷达接收机来说,外来杂波和接收机内部杂波相比,可以忽略,所以接收机灵敏度主要受内部杂波限制,只有设法减小接收机的内部杂波,才能提高灵敏度。正因为这样,雷达接收机接收微弱信号的能力又常常用“杂波系数”这个参数来衡量。在第二节将专门讨论这个问题。

2. 放大量

雷达接收机放大信号的能力,用电压或功率放大量来衡量。接收机必须有足够的放大量,才能使十分微弱的回波信号,在荧光屏上显示出来。接收机的灵敏度越高(最小可辨功率越小),显示器正常工作所需的信号幅度越大,要求接收机的放大量也越大。一般电压放大量要求 $10^6 \sim 10^9$ 倍,相应的增益为120~180分贝。

接收机所必须的放大量,分配于高频、中频放大器与视频放大器之间,但主要承担者为

$\star$ 接收机灵敏度有实际灵敏度和临界灵敏度之分。临界灵敏度是指接收机中频输出端信号杂波功率比为1时,天线输送给接收机的最小信号功率。这里说的是实际灵敏度。

中频放大器。

高频和中频放大器（即线性电路部分）的放大量，是本着这样的原则确定的：在接收机输入最小可辨信号电压的条件下，高频和中频放大器应能够把这个信号放大到1~2伏，以保证检波器正常工作。由此可知，线性电路部分必须的电压放大量为

$$K_{最低} = \frac{1 \sim 2}{U_{信, 最小}} = \frac{1 \sim 2}{\sqrt{P_{信, 最小} R_{\lambda}}}$$

考虑到输入信号在传输线、收发开关等处必然有损耗，信号在变频过程中有损失，以及防止由于电子管衰老，零件变值等引起放大量下降等多方面因素，电压放大量应留有适当的余额，一般可按上式的3倍计算，即

$$K_{最低} = \frac{3 \sim 6}{U_{信, 最小}} = \frac{3 \sim 6}{\sqrt{P_{信, 最小} R_{\lambda}}}$$

例如，某分米波雷达的灵敏度为 1.28×10^{-12} 瓦，输入电阻为75欧，若要求检波器输入端电压为2伏，则线性电路部分的功率放大量应为

$$K_P = \frac{6^2}{P_{信, 最小} R_{\lambda}} = \frac{36}{1.28 \times 10^{-12} \times 75} = 3.75 \times 10^{11} \text{ 倍, 增益为 } 115.7 \text{ 分贝。}$$

而实际指标是参放20分贝，前置中放和主中放共105分贝，加起来是125分贝，是比较富裕的。

视频放大器的放大量，取决于检波器的特性和显示器的类型。雷达接收机常用二极管检波器，当检波器输入电压为1~2伏时，输出的视频电压幅度约为0.5~1伏。辉度调制显示器（如平显）正常显示所需信号电压幅度约为20~40伏，这时，要求视频放大器的电压放大量约为20~80倍。幅度调制显示器（如距显）正常显示所需信号幅度约为50~100伏，这时，视频放大器的电压放大量应在50~200倍之间。

3. 保真度

雷达接收机的保真度用来表示接收机输出信号的波形同输入信号的波形（高频信号的包络形状）相似的程度。

保真度不好的接收机，输出信号的波形失真很大，影响测距精确度和距离分辨力。从图1—2(a)和(b)的比较中可以明显地看出：由于失真后的回波前沿倾斜，前沿的起点淹没在杂

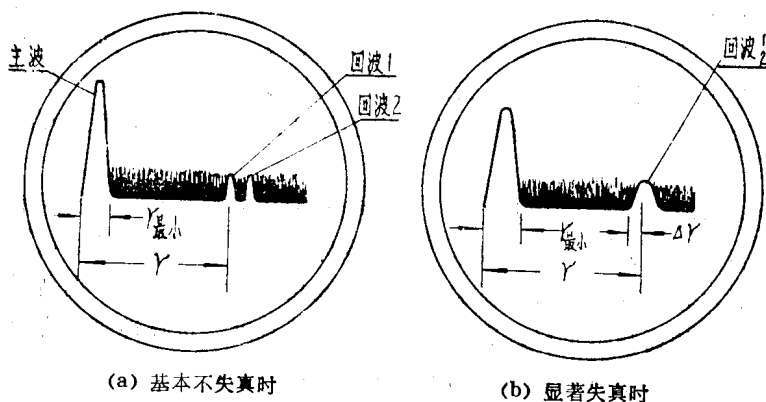


图1—2 波形失真对测距精确度和距离分辨力的影响

波之中，将影响准确地测出目标的距离（图中 Δr 便是可能有的距离误差），回波后沿倾斜，将使得原来尚可分辨的两个目标的回波交迭起来，降低了距离分辨力，并造成判断目标性质

和数量的困难。此外，失真后的主波也要变宽，还将增大雷达能够探测目标的最小距离 $r_{\min}$ 。

接收机保真度的好坏，主要由接收机中放大器的频率特性和相位特性决定。尤其是通频带的宽窄，对波形影响大。一般来说，接收机的通频带越宽，波形失真就越小。

4. 选择性

雷达接收机的选择性用来表示接收机在各种输入电压中选出所需信号的能力。雷达接收机必须能在一定的频率范围内接收目标所反射的信号，而尽量不接收其他频率的信号。这就要求雷达接收机具有适当的通频带，并且频率特性曲线的形状尽可能接近于矩形。使用雷达接收机，必须正确地调谐各个回路，保持频率特性曲线的形状良好。

5. 恢复时间与动态范围

在强信号（如发射脉冲、强回波脉冲或其他的强干扰脉冲）进入接收机以后，接收机中的某一个或几个放大器进入“饱和”状态，或者由于出现栅流使耦合电容充电而产生阻塞现象，都会使后来的小信号失去放大作用。从发生“饱和”、“过载”、“阻塞”到放大器恢复正常放大能力的这段时间称为接收机的恢复时间。为了在强信号之后能很快地接收弱信号，必须尽量缩短接收机的恢复时间。

当接收机刚发生“饱和”或“过载”时，其输入信号电平与最小可辨信号电平的比值称为接收机的动态范围。由于雷达目标有大、有小，有远、有近，因此回波信号强度的变化范围是很大的，接收机应保证对强弱信号都能正常地接收，要求接收机的动态范围尽可能大些。但一般来说，要求大的动态范围和要求小的最小可辨信号电平（高的灵敏度）是互相矛盾的，为此接收机常采用一些辅助电路如自动增益控制电路、对数放大器等抗过载电路来改善这方面的性能。

6. 抗干扰能力

雷达接收机有可能受到各种自然的和人为的干扰，如地物回波干扰和敌人施放的干扰等。为了在干扰条件下仍能测定目标的位置，这就要求在雷达接收机中增加各种抗干扰的电路和采取其他抗干扰措施，以提高接收机的抗干扰能力。

7. 工作稳定性

在各种使用条件下，接收机应当稳定而可靠地接收信号。这就要求：接收机不产生自激或寄生振荡；在工作过程中，各主要性能指标，如灵敏度、通频带、放大量等不发生显著的变化；当发射机的频率变化时，接收机仍能正常接收信号，等等。为此，在雷达接收机的电路设计、元件质量以及安装结构等方面都有一定的保证措施；在辅助电路方面则有自动频率微调电路等。

从以上介绍的情况来看，对雷达接收机的性能要求是多方面的。但实际上不可能也没有必要面面俱到，各方都照顾到。必须根据雷达的具体任务，着重满足其中重要的，有决定意义的一些要求，适当兼顾其他方面的要求。对于警戒和引导雷达来说，提高灵敏度是个重要问题；同时，接收机的通频带宽窄，影响着灵敏度、保真度、选择性等多方面的性能，也要足够重视。因此，下面两节将对这两个问题作进一步的分析。

第二节 雷达接收机的杂波和杂波系数

杂波，也就是荧光屏上显示的“茅草”，它是由接收机内部和天线上产生的一种微小的

杂乱起伏的电压或电流引起的。它对于任何波段的接收机，都不可避免地存在着，并影响着灵敏度的提高。

毛主席教导我们说：“一切矛盾都是客观存在的，我们的任务在于尽可能正确地反映它和解决它”。研究雷达接收机杂波的目的，也就在于了解杂波的来源和性质，它对接收机的影响，以便尽可能地将其影响减小到最低限度。

一、杂波的来源及其性质

雷达接收机的杂波，包括导体杂波、电子管或晶体管杂波和天线杂波等。

(一) 导体杂波

导体杂波也叫做热骚动杂波，它是由于导体（包括导线、电阻、调谐回路等）内部的自由电子热骚动而产生的。辩证法认为“整个自然界，从最小的东西到最大的东西，……都处于永恒的产生和消灭中，处于不断的流动中，处于无休止的运动和变化中。”物质的微粒，包括导体内部的自由电子，都是处于热运动状态。导体内部的自由电子在运动过程中，由于自由电子彼此之间以及它们和其它微粒之间发生碰撞的缘故，它们的运动速度和方向都在毫无规律地变化着。自由电子的这种不规则运动（骚动），相当于大小和方向都不规则变化的电流，这种电流称为杂波电流。杂波电流在导体两端所产生的杂波电压（对外电路来说，是杂波电动势）其波形大致如图1—3所示。

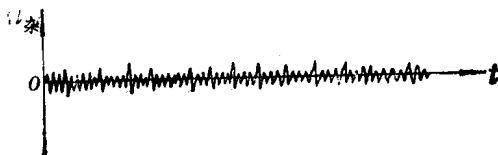


图1—3 导体杂波的大致波形

由于导体杂波是随时间不规则地、杂乱地起伏变化的，所以我们不能象对待正弦电压或电流那样，用瞬时值、振幅值等参量来表示和测量它。但人们发现，它可以用均方值（即各瞬间值平方后再求其平均值） $\overline{u^2}$ 或 $\overline{i^2}$ 来计算，而且可以用功率电表来测量，因为电压或电流的均方值，实际上代表每一欧姆电阻上所消耗的杂波平均功率。除用均方值外，有时也用均方根值 $\sqrt{\overline{u^2}}$ 或 $\sqrt{\overline{i^2}}$ 来计量，在参考书上常见用符号 $U_{\text{均}}$ 、 $I_{\text{均}}$ 代表均方根值，而且也称之为有效值。但要注意，它和正弦波电压或电流的有效值意义不同，这里只是按照习惯借用这个名词。

在雷达接收机中，如放大器等电路，都具有一定的频率特性，要进一步了解杂波的性质及其对接收机的影响，还需要了解导体杂波的频谱究竟是怎样一种结构。

导体杂波的波形很复杂，已不能简单地应用傅利叶级数分析它的频谱了。但仔细考察，它是由无数个非周期性的窄脉冲迭加而成的，而每个窄脉冲的宽度与自由电子在相邻的两次碰撞间所经历的时间相当，约为 10^{-12} 秒数量级。因此，通过对单个窄脉冲的分析，就可以大体上了解整个导体杂波频谱的基本特点。

在数学课中，我们已经分析过周期性矩形脉冲的频谱，已知其频谱包络如图1—4中曲线①所示。其规律是：第一个幅度为零的频率是 $1/\delta$ ；相邻谱线间的间隔为 $\frac{1}{T}$ （ δ 为脉冲宽度， T 为脉冲重复周期）。当周期 T 不变，只改变脉冲宽度 δ 时， δ 越小，第一个幅度为零的频率 $\frac{1}{\delta}$ 就越大，如图中曲线②、③所示。在极端情况下，如果 $\delta \rightarrow 0$ ，则 $\frac{1}{\delta} \rightarrow \infty$ 。可以设想，这

时, 各频率分量的幅度基本上趋于一样(等幅度)。拿上面提到的例子讲, $\delta = 10^{-12}$ 秒时, $\frac{1}{\delta} = 10^{12} \text{ Hz}$, 这个频率已远远超出我们雷达工作的频率范围, 所以可以认为, 在雷达的工作频率范围内, 宽度极窄的脉冲所包含的频率分量, 其幅度是均匀的, 和频率无关。再假设

设 δ 不变, 而改变周期 T 。则周期 T 越大,

谱线间的间隔 $\frac{1}{T}$ 越小, 在极端情况下, $T \rightarrow$

∞ , 则周期性脉冲变为单个脉冲, 谱线间的间隔 $\frac{1}{T}$ 就趋近于零, 说明单个脉冲的频谱

线已经没有间隔, 频率分量变为连续而不间断了。由此可知, 对于单个窄脉冲, 如果脉冲宽度极窄, 则其频谱具有连续、均匀的特点。当然, 如果只是单个窄脉冲的话, 随着脉冲宽度 δ 的不断减小, 频谱幅度不断趋于均匀的同时, 幅值也不断减小。 $\delta \rightarrow 0$ 时,

频谱幅度也就趋于无限小。但导体杂波包含

有无数个窄脉冲; 从能量上讲, 这些脉冲的能量是迭加的, 虽然其中单个脉冲的能量非常小, 但无数个脉冲的能量集中在一起, 就不是无限小而是一个定值。由此得出一个重要结论: 导体杂波的能量是均匀地分布在非常宽的频率范围内, 这个频率范围从零一直连续到约 10^{15} Hz 左右。这是导体杂波的基本特点。实践证明, 电子管、晶体管杂波以及天线杂波也都具有这个特点。

导体杂波究竟有多大? 它的大小与哪些因素有关呢? 实验证明, 导体杂波电压的均方值 $U_{\text{杂}}^2$ (即前面讲的 $\overline{u^2}$, 为了简便, 改用 $U_{\text{杂}}^2$ 表示) 与导体的电阻 R 成正比, 因为导体的电阻越大, 杂波电流产生的功率 $i^2 R$ 就越大; 与导体的温度 T 成正比, 因为温度越高, 电子的热骚动越强, 产生的杂波功率也越大; 还与测量仪表(或设备)的通频带宽度 B 成正比, 因为杂波能量均匀分布在极宽的频带内, 测试仪表的通带宽 B 越宽, 进入测试仪表的杂波能量就越多。它们的关系是:

$$U_{\text{杂}}^2 = 4kTRB, \quad (1.1a)$$

或
$$U_{\text{杂}} = \sqrt{4kTRB} \quad (1.1b)$$

式中 k ——玻耳兹曼常数, 其值为 1.38×10^{-23} 焦耳/度

T ——导体的绝对温度 ($^{\circ}\text{K}$)

B ——电路的通频带宽度

R ——导体的电阻值

如果通频带宽度 B 以千赫为单位, 电阻 R 以千欧为单位, 则在室温 $T = 290^{\circ}\text{K}$ 的条件下, 式 (1.1b) 可简化为

$$U_{\text{杂}} = \frac{1}{8} \sqrt{RB} \quad (\mu\text{V})$$

例如, 在室温下, 电路的通频带宽度为 1 MHz , 一个 100Ω 的电阻产生的杂波电压有效值

$$U_{\text{杂}} = \frac{1}{8} \sqrt{1 \times 100} = 1.25 \mu V。$$

用电阻 R 去除杂波电压的有效值 $U_{\text{杂}}$ ，可得杂波电流的表达式为：

$$I_{\text{杂}} = \frac{\sqrt{4kTRB}}{R} = \sqrt{4kTgB} \quad (1.2a)$$

$$I_{\text{杂}}^2 = 4kTgB \quad (1.2b)$$

式中 g 为电导，等于 $\frac{1}{R}$ 。

导体杂波对于接收机的其他电路来说是杂波源，以上各式表示的就是杂波源的电动势或源电流，即杂波源的开路电压或短路电流。当需要计算其杂波输出时，杂波源可用图 1—5 所示的等效电路表示。

图(a)为恒压源等效电路， $U_{\text{杂}}$ 为杂波电动势， R 为杂波源内阻，由于电阻 R 上产生的杂波电压，已由电动势 $U_{\text{杂}}$ 代表，所以内阻 R 已是不产生杂波的理想电阻。图(b)为恒流源等效电路， $I_{\text{杂}}$ 为源电流， g 为不产生杂波的杂波源内电导。

杂波源可能输出的最大杂波功率，叫做额定杂波功率，它的意义是：当负载与杂波源匹配时，负载上获得的杂波功率。根据上述定义可知，杂波源的额定杂波功率为

$$P_{\text{杂m}} = \frac{U_{\text{杂}}^2}{4R} = kTB \quad (1.3)$$

(二) 电子管杂波

电子管所产生的杂波是接收机杂波的重要来源。

在一般情况下，当电子管没有信号输入并且各电极供电电源都十分稳定时，认为阳极电流也是稳定不变的。但在研究杂波的时候，却必须看到每一瞬间到达阳极的电子数目实际上是不相等的，所以阳极电流是在一个平均值的上下杂乱地起伏变化的，大致如图 1—6 所示。阳流中的起伏分量就是杂波电流，杂波电流在负载上产生杂波电压输出。这种杂波统称为电子管杂波。电子管杂波与导体杂波的基本性质一样。

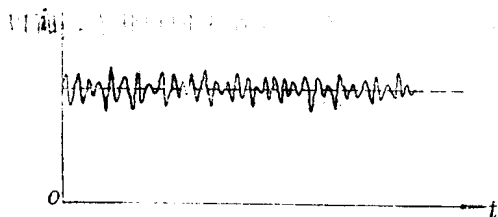


图1—6 阴流的杂乱起伏

1. 散弹效应杂波

散弹效应杂波，指的是由于电子管阴极放射电子的不规则所引起的杂波。因为，电子在阴极内部处于不规则的热骚动状态，而电子逸出阴极的能力决定于本身的动能。所以，不论是阴极温度恒定与否，每一瞬间逸出阴极的电子数目总是有差别，电子数目的变化，势必在阳流中造成杂波。

散弹效应杂波的大小，同电子管的工作状态有关：在饱和状态下，阴极放射的电子全部

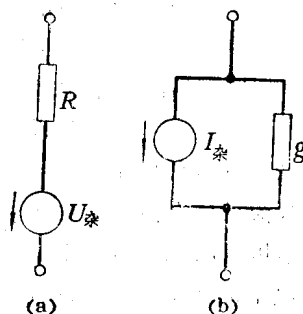


图1—5 杂波源等效电路

电子管杂波的来源有三：散弹效应、分流效应和栅极感应。前两个来源在所有波段内部都需要考虑；第三个来源同电子渡越时间有关，仅在超短波波段内才需要考虑。

到达阳极，散弹效应最显著，杂波最大。在未饱和状态下，散弹效应减弱，杂波减小。因为在阳流未饱和的情况下，阴极附近有剩余电子形成的电子云，电子云排斥从阴极放射出来的电子，只有那些初速足够大的电子才能越过电子云所形成的低电位到达阳极。阴极放射电子数目变化时，电子云的密度随之作相应变化，使到达阳极的电子数目得到调节，起到削弱散弹效应，减小杂波的作用。

散弹效应产生的杂波是各种电子管共同的主要的杂波来源。对于二极管来说则是唯一的杂波来源。由于以上原因，在测量接收机灵敏度的仪表中，常用工作于饱和状态的二极管作为杂波源，控制二极管的灯丝电压，可以改变二极管的饱和电流值，从而也就改变杂波电流的大小以达到所需的数值。饱和状态下二极管杂波电流 $I_{杂}$ 的大小可用下式计算：

$$I_{杂} = \sqrt{2eI_{饱和}B} \quad (1.4)$$

式中 e ——电子的荷电量，其值为 1.6×10^{-19} 库，

$I_{饱和}$ ——饱和电流值，

B ——测量设备或电路的通带宽。

2. 分流效应杂波

分流效应杂波是由多极管内各正电极分配电子的不规则所引起的。

多极管内部具有两个或两个以上正电极时，穿过控制栅的电子就分配在这些正电极上。由于电子运动路线的不规则，每一瞬间，各个电极分配到的电子数目都是不同的。阳极分配到的电子数目的起伏变化，造成阳流中的分流效应杂波。管内正电极越多，这种杂波就越大。五极管的杂波一般比三极管的大2~5倍，就是因为五极管中除散弹效应杂波外还有分流效应杂波，而三极管通常工作在负栅条件下，不产生分流效应杂波。

3. 栅极感应杂波

电子管工作在超短波波段时，由于电子波越时间的影响，栅极电路中要产生感应栅流，而阴极放射电子的不规则性，又必然会引起感应栅流的不规则变化，结果在栅极电路中产生杂波电压，电子管的工作频率越高，感应栅流越大，栅极感应杂波也越大。

4. 三极管的杂波等效电路

综合上述可知，三极管的杂波来源于散弹效应和栅极感应。

三极管的散弹效应杂波和二极管的性质相同，只是三极管一般工作在未饱和状态，所以杂波电流要比工作在饱和状态时小，其值为

$$I_{杂a} = \gamma \sqrt{2eI_a B} \quad (1.5)$$

或者 $I_{杂a}^2 = \gamma^2 \cdot 2eI_a B$ 。

式中 γ 为一比例系数，据计算 $\gamma^2 = 0.11 \frac{S}{I_a}$

故 $I_{杂a} = \sqrt{0.22eBS}$

$I_{杂a}$ 产生在阳极电路中，因此可以在三极管交流等效电路的信号电流源 S_{ug} 旁边并联一个杂波电流源 $I_{杂a}$ 表示，如图1—7(a)所示。还可以把这个杂波电流看作是由栅极电路中的某一个等效电阻产生的杂波电压所引起，这个等效电阻叫做杂波电阻 $R_{杂}$ 。杂波电阻 $R_{杂}$ 与 $I_{杂a}$ 的等效关系如下：

根据导体杂波的计算式可知，由电阻 $R_{杂}$ 在栅极上产生的杂波电压为

$$U_{杂a} = \sqrt{4kTR_{杂}B}$$

由 $U_{杂a}$ 引起的阳流杂波为 $I_{杂a}$

$$I_{\text{散a}} = S U_{\text{散a}} = S \sqrt{4kTR_{\text{散}}B}$$

它应该和实际产生的散弹效应杂波等值，即

$$\sqrt{0.22eBS} = S \sqrt{4kTR_{\text{散}}B}$$

在室温下，把 $T = 290^\circ K$ ，以及 $e = 1.6 \times 10^{-19}$ 库伦， $K = 1.38 \times 10^{-23}$ 焦耳/度 代入以上等式中，可求得

$$R_{\text{散}} = \frac{2.2}{S}$$

实际上测得的 $R_{\text{散}}$ 要比上式计算的稍大些，故常取

$$R_{\text{散}} = \frac{2.5}{S} \quad (1.6)$$

因此三极管的散弹效应杂波也可以用图 1—7 (b)，(c) 等效。

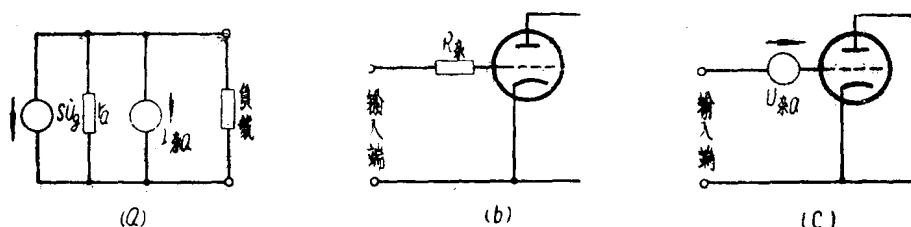


图1—7 散弹效应杂波等效电路

三极管的栅极感应杂波可以在栅极上接一杂波电流源来表示。由于栅极感应杂波电流是电子渡越时间引起的工作频率越高，杂波电流越大，这和渡越时间引起电子管输入电导 g_{λ} 的增大相一致。因此常把栅极感应杂波电流(压)看作是由输入电导(阻) g_{λ} (R_{λ}) 产生的热骚动杂波，只是这个电导(阻)的温度要比室温高 h 倍，(h 通常在 1~5 之间)。所以栅极感应杂波电流 $I_{\text{散g}}$ 或电压 $U_{\text{散g}}$ 可用下式表示：

$$I_{\text{散g}} = \sqrt{4khTg_{\lambda}B} \quad (1.7a)$$

$$U_{\text{散g}} = \sqrt{4khTR_{\lambda}B} \quad (1.7b)$$

考虑到所有这些杂波后，完整的三极管杂波等效电路如图 1—8 所示。由于 $U_{\text{散a}}$ 实际上是从阳极电路等效过来的，它和栅极电路的电阻和输入电导等无关，所以要把它画在紧靠栅极的位置。

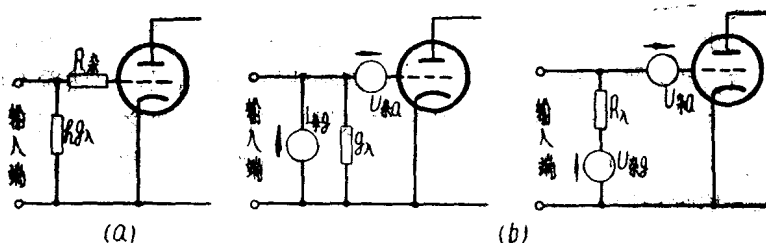


图1—8 三极管的杂波等效电路

5. 五极管的杂波等效电路

五极管杂波比三极管多一个来源，即分流效应，但分流效应杂波也存在于阳极电路中，

其结果相当于 $I_{\text{杂a}}$ 大了。分析证明,五极管的等效杂波电阻比三极管的大2~4倍。其表达式为

$$R_{\text{杂}} = \frac{I_a}{I_a + I_{g2}} \left(\frac{2.5}{S} + 20 \frac{I_{g2}}{S^2} \right) \quad (1.8)$$

式中 I_a 、 I_{g2} 分别为阳流和帘栅流,以毫安计, $R_{\text{杂}}$ 以欧姆计。

除了杂波电阻 $R_{\text{杂}}$ 不同外,其余都和三极管一样,所以五极管杂波等效电路的形式和三极管是一样的,不必另画。

(三) 天线杂波

根据物理学中的热辐射定律,任何物质总是不断地辐射和吸收热能,以在一定的温度下和周围的物质达到热平衡。而热辐射的实质也就是电磁波辐射。雷达天线周围的物质,如大气和地面等,自然也不例外,它们也都会产生电磁波辐射;这种辐射被天线接收就形成了天线杂波。至于天线导体本身产生的杂波以及天线接收到的其他杂波,则由于前者是很小的,而后者在超短波段内也很微弱,它们和上述天线杂波相比,都可以忽略不计。

假如天线周围介质的温度为 $T (^{\circ}K)$,天线的辐射电阻为 $R_{\text{天}}$,以及接收机的通频带宽度为 B ,则工作于超短波波段的的天线产生的杂波电压为

$$U_{\text{杂天}} = \sqrt{4kTR_{\text{天}}B} \quad (1.9)$$

对于接收机的输入端来说,天线是它的信号源,而由于天线杂波的存在,它又是接收机的一个杂波源。在匹配条件下,天线输入到接收机的杂波功率,即额定杂波功率为

$$P_{\text{杂天}} = \frac{U_{\text{杂天}}^2}{4R_{\text{天}}} = kTB。$$

在超短波段,温度 T 接近室温 $290^{\circ}K$,假设接收机的通频带宽度为 $2MHz$,则接收机输入的额定杂波功率为

$$P_{\text{杂天}} = 1.38 \times 10^{-23} \times 290 \times 2 \times 10^6 = 8 \times 10^{-15} (W)$$

对于高灵敏度雷达接收机,天线杂波的存在,是限制灵敏度进一步提高的障碍。因为接收机还有前面讲到的内部杂波,为了使输出信号不致于被杂波淹没,要求接收机输入的信号功率必须高出 $P_{\text{杂天}}$ 若干倍, $P_{\text{杂天}}$ 越大,要求输入到接收机的最小可辨功率也越大,所以接收机实际灵敏度的极限,决定于天线的额定杂波功率。

二、杂波系数及其计算

(一) 杂波系数的意义和表示方法

杂波系数是接收机的一个重要参数,它用来衡量接收机的内部杂波对灵敏度的影响程度。怎样来衡量这种影响呢?

我们知道,杂波总是和信号相对立而存在的,所以,要衡量杂波的影响,无疑地要和杂波与信号的相对大小,即信杂比联系起来。但就用接收机输出端的信杂比是否能衡量这种影响呢?还不行,因为输出端的信杂比,只说明内部杂波影响的结果,仍然看不出影响的原因和经过。因此,要从接收机输入端的信杂比原来怎样,经过接收机之后,在输出端信杂比后来又怎样这种对比中,看出内部杂波的影响程度,接收机的杂波系数就是这样定义的。

即,杂波系数 $N = \frac{\text{接收机输入端的信杂比}}{\text{接收机输出端的信杂比}}。$

用符号表示为

$$N = \frac{\frac{P_{\text{信,入}}}{P_{\text{杂,入}}}}{\frac{P_{\text{信,出}}}{P_{\text{杂,出}}}} \quad (1.10)$$