

雷 达 技 术 小 丛 书

晶体混频检波器

〔苏联〕Л. М. 弗道尔卓夫、И. Ш. 列辛斯基著



国防工业出版社

內 容 提 要

本书是苏联军事出版社出版的“雷达技术小丛书”之一。书中简要地叙述了厘米波段晶体混频檢波器的用途、作用原理、結構裝置和主要参数，并討論了与接收机保护放电器一起工作时的特点。此外还說明了晶体檢波器的使用規則。

本书可供初級无綫电技术人員，工人，战士及大专学生学习参考之用。

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СМЕСИТЕЛЬНЫЕ
ДЕТЕКТОРЫ

〔苏联〕Л. М. Федоринов, И. Ш. Лешинский
ВОЕНИЗДАТ 1960

*

晶体混頻檢波器

忻 洁 譯

曾 紹 求 校

*

国防工業出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 $1/32$ 印張 $1\frac{3}{4}$ 37 千字

1966年2月第一版 1966年2月第一次印刷 印数：0,001—4,350册

統一书号：15034·1085 定价：(科四) 0.20元

晶 体 混 频 检 波 器

Л. М. 弗道尔卓夫
〔苏联〕 И. Ш. 列辛斯基 著

忻 洁 译

會 紹 求 校



國防工業出版社

1966

目 录

1. 晶体混频检波器的结构及其参数	3
1. 在雷达中采用晶体混频检波器的原因	3
2. 晶体检波器的作用原理和结构	5
3. 检波器的基本参数及其测试方法	11
II. 雷达中的混频检波器的工作特点	26
1. 在发射状态下检波器的超载情况	26
2. 雷达中采用放电器与检波器一起工作时的某些特点	30
3. 雷达中的混频检波器损坏的可能原因	39
4. 波导变频器电路	41
III. 晶体混频检波器的使用规则	50
1. 使用检波器工作时的操作规程	50
2. 检波器运用过程中质量的掌握	52

I. 晶体混频检波器的结构及其参数

1 在雷达中采用晶体混频检波器的原因

雷达的最重要的参数是它的最大作用距离，也就是雷达能够发现目标的最远距离。要增加最大作用距离，原则上可以通过增加发射机的功率和提高接收机的灵敏度来实现。但是增加发射机的功率不可避免地要增大雷达的体积和重量，以及增加电能消耗。因而在设计雷达时，总是设法用提高接收装置的灵敏度的方法来加大它的最大作用距离。

雷达接收机的灵敏度决定于接收机所能接收的输入信号的最小功率值。

雷达中采用的接收机通常是超外差接收机，它能够接收最小功率约为 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ 瓦的信号。超外差接收机的主要特点，在于能把收到的高频信号变成频率较低的中频信号，然后再进行放大。其工作方框图如图 1 所示。

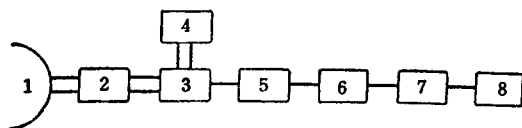


图 1 雷达超外差接收机方框图

- 1—天线；2—天线开关；3—第一检波器；4—本机振荡器；
5—中频放大器；6—第二检波器；7—视频放大器；8—显示器。

由天线 1 接收下来的高频信号（通过天线开关 2）输送到第一检波器 3——一个具有非线性伏安特性的元件。在第

一檢波器上，除了接收下來的信號外，還不斷地作用有本机振蕩器 4 所產生的信號；在厘米波段的雷達中，通常都採用反射速調管作為本机振蕩器。由目標反射回來的信號的頻率與速調管產生的振蕩頻率相互混合；由於檢波器的非線性性質，在它的輸出端上就形成了各種不同頻率的信號，其中尤以中頻成分居多；而所謂中頻也就是接收信號頻率與本机振蕩頻率之差，這個形成中頻的過程叫做變頻。非線性元件與具有本机振蕩器的耦合元件組成混頻器；而由混頻器與本机振蕩器構成的複合體就是變頻器。中頻電壓由中頻放大器 5 放大並由第二檢波器 6 檢波。包絡信號經視頻放大器 7 放大後傳遞到顯示器 8。

混頻器是雷達超外差接收機的第一個元件，到達的一系列信號就是在这个元件中開始進行變換的。接收機的靈敏度在很大程度上取決於它的工作質量。從這個觀點看來，要求混頻器的固有噪聲電平和變頻損耗尽可能地小是非常重要的。混頻器的噪聲是由於其內部非常小的雜亂振蕩電壓引起的；而變頻損耗則決定於在將到達的一系列信號從高頻變為中頻的過程中，這些信號的功率損耗。噪聲和變頻損耗愈小，則接收裝置所能夠肯定地發現的信號就可以愈微弱，因而雷達的最大作用距離也就愈遠。

晶体检波器的噪聲電平比較低，變頻損耗值尚佳。輸入電容和晶体检波器中電荷的渡越時間則要比電子管的小得多。因此，目前在厘米波段雷達中一般都採用晶体检波器●

● 更恰當的名稱是“晶体检頻二極管”，因為在雷達超外差接收機中，這個元件是用來對收到的信號進行變頻而不是檢波的。但是，由於“檢波器”這一術語已經通用，因此，今後在正文中我們仍因襲沿用。

作为混频元件。迄今为止，在高频波段中，还没有任何电子管检波器能够在检波性能和变频性能方面与晶体检波器相媲美。

2 晶体检波器的作用原理和结构

晶体检波器是一种具有非线性伏安特性的半导体二极管；视施加于其上的电压的方向和大小之不同而具有不同的电导。从这个观点看来，晶体检波器与真空二极管并没有什么区别；然而，它们的作用原理却是完全不同的。

半导体器件的整流作用的机理是非常复杂的。甚至要对它作最简单的解释，也需引用物质构造理论的论点。

自然界存在的和人造的一切材料，按照它们的导电性可以分为三类：导体、电介质和半导体，这种分类所依据的是它们的不同的电导率。导体的电导率约为 10^5 欧姆⁻¹厘米⁻¹②，而电介质的电导率则处在 $10^{-10} \sim 10^{-16}$ 欧姆⁻¹厘米⁻¹ 的范围内。电导率介于上述二者之间的物质就叫做半导体。

上述三类物质的电导率的显著的差异，是由于构成这些物质的原子结构各不相同所致。大家知道，任何物质的原子都由带正电的原子核和带负电的电子组成；且电子的负电荷等于原子核的正电荷。电子绕原子核的运动循着一定的路径进行，这条路径就叫做轨道。每一轨道都以其距原子核的平均距离和同时能够填满的最大电子数目为其表征。通常，原子中所有的内层轨道都填满了电子；而离原子核最远的外层轨道则可能是未填满的。

② 电导率就是边长 1 厘米的立方体，沿着它的边长方向通过电流时，所具有的导电量。

原子中的每一个电子都以一定的相互作用力与原子核联系着；力的大小跟电子与原子核之间的距离有关。外层电子所受到的束缚力比内层电子的弱。此外，外层电子与原子核之间的束缚力还与该轨道上的电子总数有关。它们与原子核之间的束缚力随着这些电子的数目的增长而增大。

导体是由这样的一些原子组成，在它们的外层轨道上有一个、二个或者三个电子。这种电子叫做价电子，它们所受到的原子核的束缚力非常微弱。实际上，价电子并不束缚于该物质中的任何确定的原子，而是处于在诸原子之间的无规则的运动状态之中，因此它们也叫做自由电子。在电场的作用下，固体中的自由电子的这种无规则运动就取得了一定的方向，结果就产生了电流。由自由电子体现的导电现象叫做电子导电，它的数值正比于单位体积内自由电子的浓度。

在一定条件下，电子可以从导体原子的某一内层轨道跃迁到外层轨道上来。在这情况下，原子内部就出现了没有充填电子的空位置，该位置叫做空穴。这个位置可以为邻近原子中的某一内层轨道的电子所占据。这时，在失去了电子的那个邻近原子中也就形成了空穴。这样一来，空穴就发生了一种奇特的移动；正如理论所指出的那样，它相当于这样的一些粒子的移动，这些粒子的质量与电子质量相同，其电荷与电子电荷等值而反号。加上电场后，空穴的运动就变成有方向的了，这种导电现象叫做空穴导电。空穴导电的大小正比于单位体积内空穴的浓度。

属于电子导电性的导体有铜、金、银等金属。具有空穴导电性的有钼、钨、锌以及许多其他的物质。导体的高电导率被解释为由于它们的自由电子浓度和空穴浓度很大所致。

介质是由这样的一些原子組成：它們的外层軌道上都填滿了或者几乎填滿了电子。在这种情况下，外层軌道上的电子受到的原子束縛力很大；要使电子脱离原子就需要很大的能量。电介质中的自由电子濃度很低，所以它們的电导率也非常小。

半导体介于导体与电介质之間。按它們的导电性质可分为二类：电子导电性的半导体（ n 型）和空穴导电性的半导体（ p 型）。 n 型半导体中的多数載流子是自由电子。在这种半导体中，除了电子之外，也有空穴存在。不过它們的濃度比电子濃度低得多。所以，在 n 型半导体中，空穴是少数載流子。在 p 型半导体中，空穴是多数載流子，而自由电子則是少数載流子。

半导体的电导率决定于多数載流子的濃度。在半导体中掺入一定的杂质后，能够大大地提高多数載流子的濃度。这种半导体的导电叫做杂质导电，而純半导体的导电則叫做本征导电；两者是互不相同的。用于晶体檢波器的半导体具有杂质导电性。例如，在硅中，为了提高其空穴导电率而掺入硼；在鍺中，为了提高其电子导电率則掺入銻。

两块不同类型的半导体叠在一起，在它們的交界面上会形成具有非綫性伏安特性的电子——空穴結或 $n-p$ 結[●]。

如果将电压的正极接在 p 型半导体上，将負极接在 n 型半导体上，則多数載流子（即 p 型半导体中的空穴和 n 型半导体中的电子）就朝 $p-n$ 結方向运动，并在那里結合起来（复合）。在这种情况下，通过 $p-n$ 結的电流量决定于半导

● $n-p$ 結也常称作势垒或阻擋层（按我国习惯，以下改称 $p-n$ 結——校者注）。

体中多数载流子的浓度。这时，电压和电流的方向取作正向。

当外加电压的极性改变时，则多数载流子就朝着与 $p-n$ 结相反的方向流动。结果，在 $p-n$ 结两侧就形成了多数载流子很稀少的一个层。通过结的电荷迁移，是由浓度极低的少数载流子进行的。在这情况下，结上的电阻就急剧上升。这时的电压和电流的方向取作反向。

这样，两块不同类型的半导体的接触就具有整流性质。与二极管相比拟， p 型半导体可看作阳极； n 型半导体可看作阴极。

晶体检波器的制造工艺使我们能够在半导体的表面上取得若干区域，它们都具有电导性与半导体本体相反的薄的导电层。在薄层与本体之间的交界面上形成 $p-n$ 结，并在其中对交流电进行整流。由于这些区域的面积很小 (10^{-6} 厘米²)，所以电流的引导是用点接触进行的；点接触的面积不超过该区的面积。接触所产生的电容量 (约 1 微微法) 很小，我们能够用来对超高频信号进行检波。接触点是用硬而有弹性的材料制成的弹簧来实现的；弹簧尖端直径为 0.1 毫米，通常用铂铤合金或钽铌合金制成。

接触弹簧加在半导体表面上的压力的大小有着重大的意义。压力很大时，接触弹簧的尖端就要被锉钝，从而使得接触面积增大。此外，压力很大时，还会使半导体的表面层遭到破坏，也就是说，使 $p-n$ 结遭到破坏。压力很小时，则接触的机械性质就变得不稳定了。

接触弹簧的机械调节是根据检波器的伏安特性曲线的形状来进行的。在硅检波器中，弹簧的调节及其位置的固定由

装配工艺来加以保证。在锗检波器中，则是利用接触点在短促的时间内通过大密度的电流（约 10^6 安/厘米²），将接触弹簧焊在半导体的表面上的方法进行固定的。这种接触叫做电形成接触。其特点是机械强度高和伏安特性曲线的斜率大。

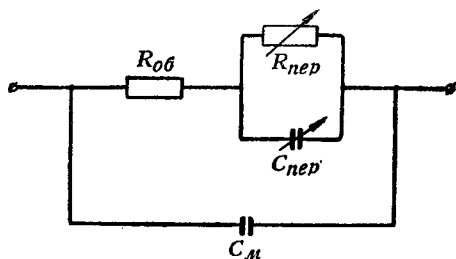


图2 检波器等效电路图

$R_{нп}$ — $p-n$ 结的非线性电阻； $C_{нп}$ — $p-n$ 结的非线性电容；

$R_{об}$ —半导体的体电阻； $C_{м}$ —接线电容。

图2所示是检波器的等效电路。检波器的电性质取决于 $p-n$ 结的非线性电阻 $R_{нп}$ 和非线性电容 $C_{нп}$ 。 $R_{нп}$ 和 $C_{нп}$ 的大小与外加电压的极性和数值有关。半导体的体电阻 $R_{об}$

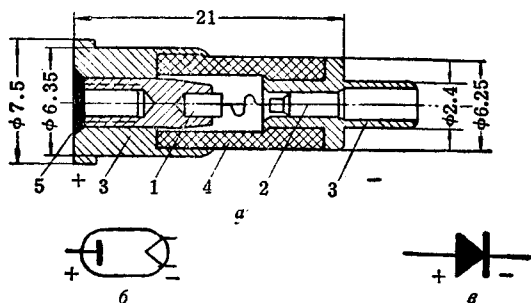


图3 硅检波器 DK-C1-4

a —结构； b —等效二极管； B —在电路中所使用的符号。

1—与晶体相连的销钉；2—与接触弹簧相连的销钉；3—接头；

4—瓷壳；5— $\text{B}\Phi-2$ 胶。

約几欧姆，接綫电容通常为 1 微微法左右。

目前，人們都采用硅和鍺混頻檢波器。前者具有 p 型导电性；后者具有 n 型导电性。

图 3 和 4 所示是硅和鍺檢波器的結構和在电路中所使用的符号。它們的外形則示于图 5。

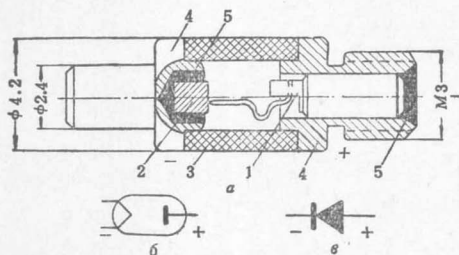


图 4 鍺檢波器 Д-403В 和 Д-403В

a —結構； $б$ —等效二极管； B —在电路中所使用的符号。

1—与接触彈簧相連的銷釘；2—晶体；3—瓷壳；

4—接头；5—БФ-4胶。

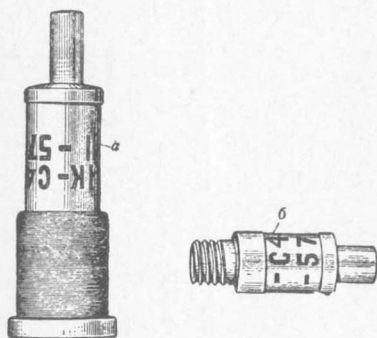


图 5 某些檢波器的外形

a —檢波器 ДК-С4； $б$ —檢波器 ДГ-С4 (Д-403В)。

3 檢波器的基本参数及其测试方法

晶体檢波器的质量取决于表征它們在雷达超外差接收机中工作的合适性的若干基本参数。属于这些参数的有：变频損耗、整流电流、噪声温度以及檢波器的直流参数。檢波器在高频信号变换方面的合适性的基本标准，在于它是否能保証雷达接收机具有规定的灵敏度。

变频損耗和整流电流

如同上文已經指出的那样，晶体檢波器把目标回波信号与本机振蕩器的信号加以混合。結果，在混頻器輸出端上就給出中頻信号，并由接收机加以放大。变频損耗 L 定义为輸入高频信号功率 $P_{в.ч}$ 与中頻变频信号功率 $P_{п.ч}$ 之比

$$L = \frac{P_{в.ч}}{P_{п.ч}},$$

或

$$L_{(дБ)} = 10 \log \frac{P_{в.ч}}{P_{п.ч}}.$$

变频損耗愈小，則为了在輸出端上获得同样幅度的变频信号所要求的輸入信号幅度愈低，因而接收机的灵敏度也愈高。

要确定变频損耗值，必須知道輸入信号和变频信号的功率。但是，变频損耗的这种直接测量方法在实际施行时是十分复杂的，因而通常都代之以一种所謂調制法。这个方法的实质是使本机振蕩器的連續調幅信号作用在檢波器上。这时，檢波器的負載上除了有直流分量之外，还有調頻交流分量，其幅度与檢波器的变频損耗值有关。

变频损耗测试装置的方框图如图 6 所示。

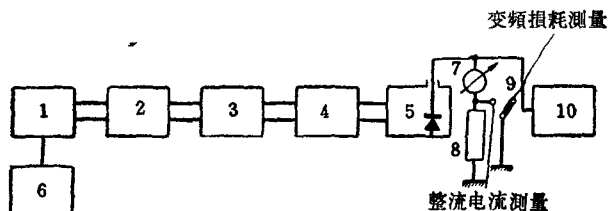


图 6 混频检波器的变频损耗的测试装置的方框图

- 1—本机振荡器；2和4—去耦衰减器；3—调制衰减器；5—检波装置；6—电源；7—测量整流电流的仪表；8—检波器的负载；
9—测量整流电流时使负载短路的开关；10—真空管伏特表。

本机振荡器的功率用调制衰减器来调制，衰减器则由电动机带动。衰减器的主要零件是一个偏心的吸收圆片，安装在电动机轴上。圆片的一部分通过波导的宽壁上的缝隙伸入波导内；给波导系统带来一定的衰减。电动机转动时，圆片在波导内的部分的面积作周期性的改变，于是，由衰减器带来的衰减也以同样的频率改变。因此，施加在检波器上的连续功率的幅度就以与波导系统中的总衰减值的变化相应的方式，而在其平均值附近作一定幅度的变动。

变频损耗与施加在检波器上的，本机振荡器的平均功率值有关，并随后者的增大而减小。因此，变频损耗的测量要在严格地固定的平均功率值下进行；这可以借助于去耦衰减器来达成。检波器ДК-С3、ДК-С4、Д-403Б和Д-403В的平均功率是1毫瓦；而ДК-С1、ДК-С2的则为0.5毫瓦。

变频损耗值由下式决定：

$$L = \frac{m^2 PR}{U^2},$$

或

$$L_{(\text{分貝})} = 10 \log \frac{m^2 PR}{U^2},$$

式中 P —— 施加在檢波器上的平均功率;

R —— 檢波器的負載电阻;

m —— 功率調制系数; 等于施加在檢波器上的功率的交流分量的振幅与其平均值之比;

U —— 檢波器負載上的調頻电压的有效值; 用真空管伏特表測得。

變頻損耗值通常用分貝来表示。按照變頻損耗的最大值确定的标准是: 檢波器 ДК-С1、ДК-С3 和 Д-403Б 是 8.5 分貝; ДК-С2 和 ДК-С4 是 6.5 分貝。

整流电流表征着檢波器在高频波段的整流特性。同时, 檢波器的整流还与其變頻損耗有着紧密的联系, 整流电流减小, 變頻損耗就增大。显然, 如果檢波器的整流电流太小, 就已經不太适合于对高频信号进行檢波和變頻。因此, 人們就根据各种檢波器的整流电流的最小值来确定它們的标准。对于檢波器 ДК-С1、ДК-С2 和 ДК-С3、ДК-С4 來說, 当本机振蕩器的功率分別为 0.5 和 1 毫瓦时, 这个标准都确定为 0.4 毫安。

檢波器的整流电流和變頻損耗可以同时測量, 其法是在檢波器的負載电路中接入一个毫安表。根据一般的技术条件, 在測量變頻損耗时, 檢波器的負載电阻应为 400 欧姆, 而在測量整流电流时, 則应为 50 欧姆。当檢波器的轉換开关从一个負載轉換到另一个負載上时, 就将 350 欧姆的电阻接到負載电路中去。此时, 檢波器的負載仅仅是毫安表的內阻, 等于 50 欧姆。

噪 声 温 度

对于保证雷达接收机具有所要求的灵敏度来说，检波器的另一个高频参数——决定着检波器的噪声特性的噪声温度——也是很重要的。

大家知道，任何物体中的各种微粒——分子、原子、电子都处在紊乱的热运动状态之中。这种运动的剧烈程度决定于物体的温度。在导体中，电荷的这种热运动会激发微量的电流和电压。因此，在任何导体中，即使在沒有外部能源存在的情况下，也仍然有微量的电流和电压存在，其形式则决定于这些激发的总和。我们称之为电流的热涨落或热电噪声。

热噪声可以用解析法表达为連續諧振譜的形式，并且，在从零到非常高的频率范围内，都具有相等的振幅和随机的相位。这就是说，导体中的热噪声包含各种谐波振荡，并且，在整个频率范围内它们的振幅都是一样的。

在一定的频带 Δf 内，由电阻 R 所引起的热噪声的强度可以用热噪声电压的有效数字的均方值来表示；其大小由下列关系决定：

$$U_{\text{均}}^2 = 4RkT\Delta f, \quad (1)$$

式中 $U_{\text{均}}^2$ ——热噪声电压的有效数字的均方值；

k ——波兹曼常数，等于 1.38×10^{-23} 焦耳/度；

T ——导体的绝对温度 ($^{\circ}\text{K}$)；

R ——电阻；

Δf ——谱的频带，电压的有效数字就是在这个范围内确定的。

在电阻中发生的热噪声功率

$$P_r = \frac{U_m^2}{R} = 4kT\Delta f.$$

如果在电阻 R 上以电阻 R' 的形式接入一个外部负载, 那末, 在电阻 R 中产生的热噪声功率就有一部分在该负载中释出。当 $R' = R$ 时, 这一部分功率达到最大值, 并且等于 $kT\Delta f$ 。能在外部负载上释出的, 电阻的这一部分热噪声的极限功率叫做电阻热噪声的标称功率。

除了电阻之外, 电子器件也是一些噪声源。电子管中产生的噪声叫做霰粒效应噪声, 它是由于在不同的时刻从阴极飞出的电子数量不一致而引起的。与热噪声一样, 霰粒效应噪声也可以表示为具有相同振幅和随机相位的連續諧振譜的形式。

霰粒效应对接收机的灵敏度产生消极的影响, 因而要想尽一切方法力图使之减弱。但是, 在制造专门的噪声发生器时, 却利用这个效应。用于测试装置中的噪声二极管就是其中之一例。

在接收机的输入电路中总是有这二种噪声源存在。由于噪声具有連續的頻譜, 所以处在放大器通帶範圍內的那一部分就能够为放大器所放大。在显示器的荧光屏上能观察到所謂“噪声毛草”式的噪声 (图 7)。放大器的通頻帶愈寬, 則它所能放大的那一部分噪声譜也愈寬; 接收机輸出端上的噪声电压也就愈大, 在接收窄帶信号时的信号噪声比也就愈小。

只有当目标回波信号的振幅大于接收机輸入噪声振幅时, 才能在显示器的荧光屏上观察到这些回波信号。否則接收机輸出端上的信号与本机噪声就不可分辨。因此, 对高灵敏度的雷达接收机來說, 設法在接收信号还很小的輸入电路