



半导体雷达接收机电路

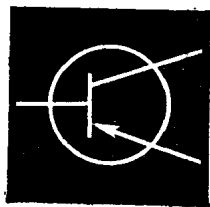
(中 频 、 视 频 部 分)

上海人民出版社

半导体雷达接收机电路

(中 频、视 频 部 分)

上海市仪表电讯工业局
上海科学技术大学《7·27》工人电子训练班 编



上海人民出版社

内 容 提 要

本书主要介绍半导体雷达接收机电路的中频放大器、视频检波器和视频放大器。有关雷达接收机的高频部分则另书介绍。

本书阅读的主要对象是有中等文化程度的工人、技术人员。书中力求避免过深的数学分析,加强了物理概念的叙述,并介绍了有关的实用电路,以供参考。

半 导 体 雷 达 接 收 机 电 路

(中频、视频部分)

上海市仪表电讯工业局 《7·27》工人电子训练班 编
上海科学技术大学

上海人民出版社出版

(上海绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 上海市印刷四厂印刷

开本850×1156 1/32 印张7.125 插页2 字数184,000

1971年7月第1版 1971年7月第1次印刷

书号: 15·4·154 定价: 0.50 元

发行范围: 只限国内发行

毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

打破洋框框，走自己工业发展道路。

前 言

遵循伟大领袖毛主席关于“要无产阶级政治挂帅，走上海机床厂从工人中培养技术人员的道路”的教导，上海市仪表电讯工业局革委会和上海科学技术大学革委会在工人阶级领导下，联合举办了“7·27”工人电子训练班。进行了为期一年的教育革命实践。

为了适应我国电子工业飞速发展的形势和广大工人、革命技术人员生产实践的需要，我们在电训班教材的基础上，深入生产实践，编写了《半导体雷达接收机电路》一书。参加本书编写工作的有工人、革命技术人员和革命教师。十余个有关工厂、院校参加了本书初稿的讨论，并提出了许多十分宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。

遵循伟大领袖毛主席关于“教材要彻底改革”的教导，在本书编写过程中，我们开展了革命的大批判，批判叛徒、内奸、工贼刘少奇所散布的“洋奴哲学”、“爬行主义”等反革命修正主义黑货，坚持“独立自主”、“自力更生”和“洋为中用”的方针，力图使本书具有革命性、实践性和先进性。

由于我们对毛主席著作学得不好，用得不活，加上生产经验有限，书中肯定存在不少错误和缺点，殷切期望广大工人、革命技术人员提出批评和意见。

编 者 1971年6月

目 录

第一章 雷达概述

1-1 雷达的种类及用途	1
1-2 雷达的工作原理	3
1-3 雷达发射机的技术指标	8
1-4 雷达接收机的技术指标	13

第二章 晶体管的高频参数及高频等效电路

2-1 晶体管高频等效电路	22
2-2 晶体管频率特性参数	27
2-3 晶体管噪声系数	34

第三章 中频放大器

3-1 中频放大器概述	38
3-2 单调谐中频放大器	46
3-3 双调谐中频放大器	60
3-4 参差调谐中频放大器	66
3-5 中频放大器的稳定性与中和	73
3-6 中频放大器设计	79
3-7 共发-共基级联中频放大器	94
3-8 具有窄带滤波器的中频放大器	98
3-9 雷达中频放大器实例	103
3-10 宽频带中频放大器的结构、安装与测试	108
3-11 自动增益控制与对数中频放大器电路	126
3-12 中频放大器的集成化	149

第四章 视频检波器

4-1 视频检波器概述	167
4-2 二极管检波原理	169

4-3 检波器元件的选择原则	172
4-4 双端式二极管检波器	177

第五章 视频放大器

5-1 未加补偿的视频放大器——视频放大器的分析方法	179
5-2 高频(脉冲前沿)补偿	183
5-3 低频(脉冲顶部)补偿	190
5-4 关于温度补偿问题的讨论	192
5-5 多级视频放大器	195
5-6 雷达中的视频放大器	197
5-7 视频放大器的结构特点, 调整及测试	203
5-8 对数视频放大器	210

第一章 雷 达 概 述

我们伟大的领袖毛主席在一九七〇年五月二十日发表的“全世界人民团结起来，打败美国侵略者及其一切走狗！”的庄严声明中指出：“新的世界大战的危险依然存在，各国人民必须有所准备。但是，当前世界的主要倾向是革命。”

为了建设强大的社会主义祖国，为了反对帝国主义、社会帝国主义的侵略政策，我们必须从思想上，物质上，组织上作好充分的准备。我们的肩上担负着既光荣又艰巨的任务。

雷达在国民经济中有着广泛的用途，同时它又是一种重要的武器，在战斗中，特别是在对付敌人的突然袭击方面能起很大的作用。雷达也已广泛应用在社会主义建设的各个领域。革命要求我们试制和生产更多、更新、更好的雷达。为了出色地完成这个任务，我们应当通过勤奋的学习，尽快地掌握有关雷达的专业知识，以便把技术大权牢牢地掌握在工人阶级手里。

毛主席教导我们：“武器是战争的重要因素，但不是决定的因素，决定的因素是人不是物。力量对比不但是军力和经济力的对比，而且是人力和人心的对比。军力和经济力是要人去掌握的。”用毛泽东思想武装起来的人就是最强的战斗力。有了毛泽东思想，就能使武器发挥最大的效能。英雄的中国人民解放军指战员，在珍宝岛保卫战中，就是靠了战无不胜的毛泽东思想，英勇善战，一往无前，“一不怕苦，二不怕死”，用革命化打败了社会帝国主义的机械化。我们学习和制造雷达，也必须突出无产阶级政治，彻底批判叛徒、内奸、工贼刘少奇所散布的单纯技术观点，按照毛主席的无产阶级革命路线，坚定地走我国自己发展雷达工业的道路。

1-1 雷达的种类及用途

根据雷达在军事和国民经济各个领域中的用途，雷达大致可

以分成下列几种型式:

1. 警戒雷达 主要是用来发现远距离目标,例如导弹、飞机、军舰等,以便提供警报,作好战斗准备。这种雷达要求作用距离远,例如几千公里以外的目标也能发现。但对测定目标位置的准确度的要求并不十分高。

2. 炮瞄雷达 能精确地测出目标的位置并进行自动跟踪。利用炮瞄雷达和射击指挥仪,可以控制火炮对准目标,并在判断出目标已经进入射程以内时,进行射击。这种雷达要求对目标位置测量的准确度相当高,距离误差要在一、二十米左右,角度的测量误差不得大于百分之几度。但这种雷达的作用距离不要求十分远,一般在一、二百公里就可以了。

3. 制导雷达 主要用来控制和引导我方的导弹去截击敌机、敌舰和导弹,并能控制和引导导弹起飞,控制、引导卫星和飞船进入预定的轨道。这种雷达既要求有相当远的作用距离,又要求有十分高的测量准确度。为此,这种雷达通常与电子计算机一起完成制导任务。

4. 自导雷达 是一种装在导弹头部的雷达,它的作用是在导弹起飞后,能自动跟踪目标,引导导弹向目标飞去,使导弹能准确地与目标相碰或在靠近目标处爆炸。

5. 空用截击雷达 截击雷达装在战斗机上,用以准确地测出敌机的位置,然后发起攻击。对于这种雷达,要求体积小,重量轻,测量精度高,分辨能力强,但作用距离不要求过远。

6. 机尾保护雷达 这种雷达用以发现和指示有无敌机从我机尾部袭来。当有敌机袭来时,雷达便发出一个简单的信号通知飞行员。

7. 探照灯雷达 是一种装在探照灯上的自动跟踪雷达,这种雷达能发现比探照灯照距更远的飞行目标,并对它进行自动跟踪,以便高炮射击。对于这种雷达,要求角坐标的测量精度高,而测距精度不必很高。

除上述几种雷达外,还有能对高空目标(例如人造卫星、洲际

导弹等)进行自动跟踪,并根据测得的距离、高度、方位、速度及飞行轨道来判别目标类型的自动跟踪雷达及采用密码通信的敌我识别雷达等等。雷达在国民经济中应用也十分广泛,常见的有:

1. 导航雷达 装在民航飞机和远洋船舶上,用以显示地面或港湾的图象,以便在遇到黑夜和浓雾时,驾驶员能正确地领航。

2. 气象雷达 是用来观察气象,例如测定暴风雨的位置、移动速度和轨迹,以及测定测候气球的位置等。

3. 天文雷达 用来观察天文,例如,测定流星的运动,研究月球和太阳等。

雷达按照工作方式可以分为调频制雷达、多卜勒效应雷达和脉冲制雷达等。

雷达按照工作波长可以分为米波雷达,分米波雷达,厘米波雷达和毫米波雷达等。

工作在厘米波或毫米波波段的脉冲制雷达为最常见,本书我们只介绍这一种雷达体制。

1-2 雷达的工作原理

“雷达”又称无线电定位,它是利用电磁波受目标反射的现象来探测目标的方向和距离。

雷达主要由发射机、接收机、显示器、触发电路(又称同步设备)等部分组成,如图 1-1 所示。

发射机通过天线发射出由脉冲调幅的超高频(射频搜索脉冲)电磁波,此电磁波在空间沿直线传播,遇到目标后反射,反射回来的脉冲信号称为回波,它被接收机接收后由显示器显示出来。由于电磁波自雷

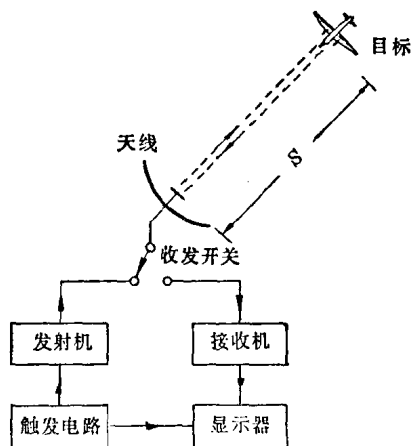


图 1-1 雷达机的基本组成

达站至目标往返一次的距离为 $2S$ ，若在示波管萤光屏上搜索脉冲和回波间的时间间隔为 Δt ，如图 1-2 所示，则按式(1-1)就能确定目标与雷达站的距离。

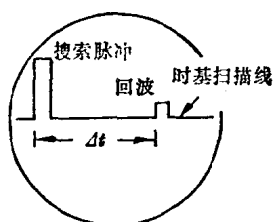


图 1-2 距离显示器
萤光屏上的图形

$$S = \frac{c\Delta t}{2} \quad (1-1)$$

式中： c 为电磁波在自由空间的传播速度，与光速相等，即

$$c = 3 \times 10^8 \text{ 公里/秒}$$

电磁波来回一次所需的时间间隔 Δt 通常以微秒 (μs) 计算。目标与雷达站之间的距离 S 通常以公里、哩、公尺(米)为单位计算。

〔例 1-1〕 若雷达接收机收到某一目标的回波与搜索脉冲的时间间隔 Δt 为 10 微秒，则该目标距雷达站的距离

$$S = \frac{c\Delta t}{2} = \frac{3 \times 10^8 \times 10 \times 10^{-6}}{2} = 1500 \text{ 米}$$

由此可见，雷达测距的原理实际上是将距离的测量转换成为时间的测量，萤光屏上信号间的时间间隔每 1 微秒就代表目标相距 150 米。在实际使用中是不采用公式一一计算的，而是直接在萤光屏上标出距离刻度。

为了确定目标的位置，除了测出距离以外，还必须测出目标的方位，这就是测向。测向是依靠定向天线来实现的。雷达天线具有很高的方向性，它能集中地向某一方向发射电磁波。同样，它也只能接收沿同一方向来的回波。天线由马达带动而旋转，象探照灯那样向四周扫射。只有当天线转到正对目标时，电磁波才能射到目标上并被反射回来。根据这个道理，当发现目标时，天线的方向就是目标所在的方向，这个方向由平面位置显示器中与天线同步旋转的时基扫描线表示出来，如图 1-3 所示。

现在暂时撇开那种能根据所测目标的方位与距离来自动跟踪目标的雷达不谈，我们来看一看典型的直接观察式雷达机的方框图，如图 1-4 所示。

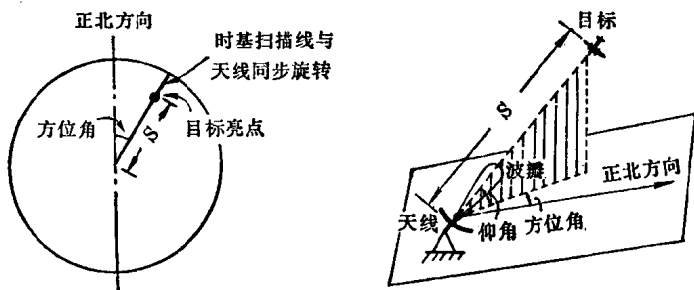


图 1-3 平面位置显示器荧屏上的图形

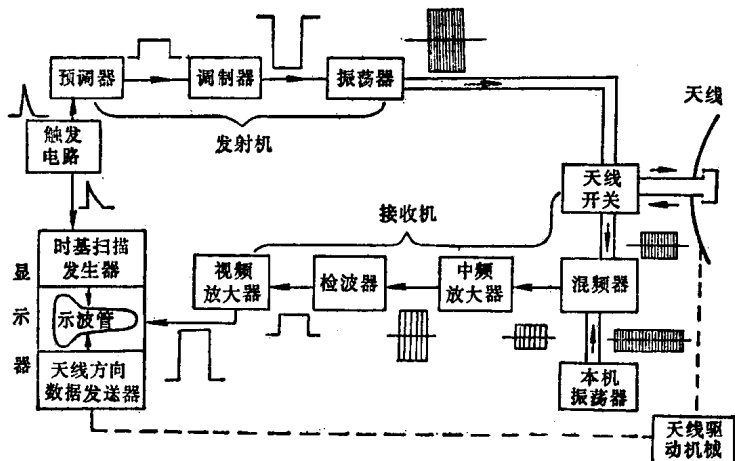


图 1-4 典型的直接观察式雷达机的方框图

触发电路是雷达的指挥中心，它每隔一定的时间间隔送出一个尖脉冲信号，“命令”发射机开始工作，同时“通知”显示器开始计算时间（时基扫描发生器开始扫描）。

发射机一般由预调器、调制器和振荡器组成（有的机器没有预调器）。它的任务是每隔一定时间 T 产生一次短促的强功率超高频振荡（或特高频振荡）。振荡器的工作时刻即持续期 τ 由调制器的输出脉冲控制。而预调器则受触发电路控制，它每受一次触发，产生一个一定宽度的矩形脉冲。这个脉冲就是雷达的搜索脉冲，

它被振荡器产生的载波所载送,并通过天线开关、馈电线(波导)和天线而向外发射。发射机各级的波形如图 1-5 所示。图中 T 称为脉冲的重复周期,而 τ 称为脉冲持续期(或脉冲宽度)。

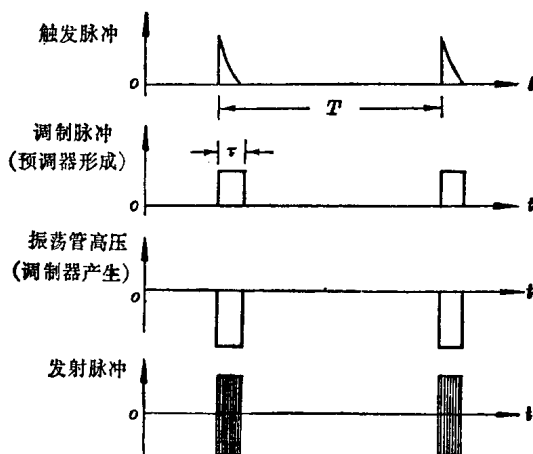


图 1-5 雷达发射机各级波形

天线开关的作用是当发射机发射时,让发射脉冲顺利地通向天线。与此同时发射的强大脉冲自动截断接收机支路,以保护“脆弱”的接收机中的晶体混频器(或高频放大器)不致被强大的发射脉冲功率所烧毁。而当回波到来时,能让微弱的回波顺利地进入接收机。

发射机、接收机与天线之间由馈电线(传输线)沟通。馈电线随雷达工作波段而异,米波波段一般用双导体明线,分米波波段用硬同轴线,厘米、毫米波波段多用矩形波导。定向天线种类很多,厘米波波段通常采用的有抛物面天线、喇叭天线等。天线和馈电线构成雷达站的天馈系统,天馈系统的性能对雷达站的性能影响很大。

雷达接收机通常都采用超外差式。它由高频设备(包括天线开关、混频器、本机振荡器等)、中频放大器、检波器、视频放大器组成。从天线接收下来的射频脉冲加到混频器上,本机振荡器产生的连续振荡功率也同时加到混频器上,混频器输出的信号频率是本

机振荡频率和射频之差,称为中频。中频信号经中频放大器放大大约一百多分贝(相当信号电压放大 10 万倍以上),用检波器取出其脉冲包络(称为视频脉冲),再由视频放大器放大到显示器正常工作所需要的电压数值。接收机各级波形如图 1-6 所示。

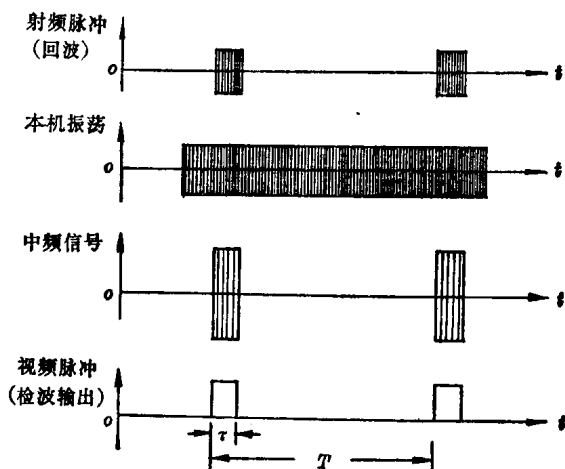


图 1-6 超外差式雷达接收机各级波形

随着我国半导体工业的迅速发展,雷达接收机中的混频器、中频放大器、检波器和视频放大器都已经半导体化,只有微波雷达接收机中的本机振荡器还沿用着反射速调管。反射速调管具有调谐方便的突出优点,这对实现自动频率微调有利。但是目前各种固态微波源已经出现,例如电调谐的雪崩渡越时间二极管振荡器、体效应器件振荡器等等,而且已能成功地用作雷达接收机的本机振荡器。因此雷达接收机的全半导体化是指日可望的。

如果在天线开关与混频器间加一个高频放大器,则雷达接收机的灵敏度将提高,雷达站的作用距离将会增加。但在厘米、毫米波波段,长时期找不到合适的低噪声高频放大管,因而过去厘米、毫米波波段的雷达接收机很多没有高频放大级,而采用第一级就混频的型式。虽然第二次世界大战后不久就出现了低噪声行波管,但是由于它要笨重的馈电聚焦系统,在有些场合不便应用。目

前除了低噪声行波管外,隧道二极管放大器,半导体参量放大器和量子放大器已越来越多地被用来作为低噪声的高频放大级,以改善雷达的性能。

1-3 雷达发射机的技术指标

雷达发射机的技术指标是根据雷达站的用途确定的。不同的用途就对雷达的战术特性提出不同的要求。战术特性主要包括最大作用距离,最小可测距离,距离分辨能力,方位角分辨能力,仰角分辨能力,抗干扰性能,允许尺寸重量等等。

因此,雷达发射机的技术指标有:工作波长(工作频率)、发射功率、效率、脉冲宽度、脉冲重复频率、脉冲波形等等,现分述如下:

一、工作波长

在选择雷达发射机的工作波长时,要考虑下列几个因素:

(1) 当天线波瓣形状(方向性)确定后,天线尺寸随波长的缩短而减小;而当天线尺寸确定后,波长越短,则方向性越好,雷达作用距离可相应增大,角分辨能力也相应提高,如图 1-7 所示。

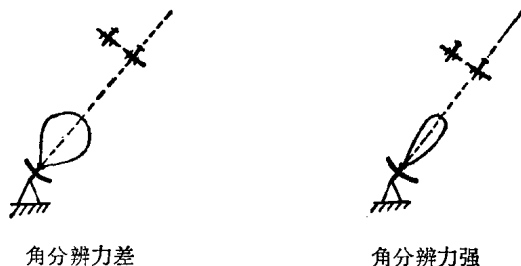


图 1-7 天线方向性对角分辨能力的影响

(2) 电磁波的传播与波长有关。米波受空气、云、雨、雾的吸收较少,但因地面反射,将使天线的方向性受到影响。厘米波受地面反射的影响较小,但当波长短于 3 厘米时,受空气、云、雨、雾吸收和反射的影响却较大。

(3) 载波波长越短,则脉冲宽度可以越小,这对提高距离分辨能力有利。应用毫米波,可使雷达分辨能力大大提高,以至获得电

视的效果。

(4) 发射管的功率随工作波长的缩短而减小。

对于各种用途的雷达发射机,它们的工作波长就各不相同:

空用及海用雷达由于受体积重量的限制,应用较小的天线,因此这种雷达一般都选用厘米波和毫米波波段。

地面炮瞄雷达,考虑到要有较好的方向性,较强的分辨力和良好的跟踪性能,而为了转移阵地的方便,天线又不能很大,因此,其工作波长都选择在厘米波和毫米波波段。

陆用警戒雷达,对天线无苛刻的限制,但要求发射功率大,作用距离远,多用分米波和米波波段(米波电子管功率大,同时地面的反射也有助于增加作用距离)。但从运输、维护、军事荫蔽等方面考虑,过长的工作波长也是不适宜的。

气象雷达应工作于有强烈气象反射的厘米波波段。

如果要求一定的抗干扰性,则雷达发射机的工作波长应能迅速地变换。这样就希望能有宽频带的无惯性调谐的发射管。

二、发射功率

雷达发射机的功率主要取决于最大作用距离。自由空间的最大作用距离由如下关系决定:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_t}{P_{r\min}}} \times \frac{S_a S_o D_a}{(4\pi)^2} \quad (1-2a)$$

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_t \cdot \tau}{W_{r\min}}} \times \frac{S_a S_o D_a}{(4\pi)^2} \quad (1-2b)$$

式中: P_t 为发射机的脉冲功率;

$P_{r\min}$ 为接收机所能接收的最小脉冲功率(最小可辨功率);

$W_{r\min}$ 为接收机的最小可辨能量;

τ 为脉冲宽度;

S_o 为目标有效面积;

S_a 为天线有效面积;

D_a 为天线增益系数。

在其他因素一定时, 最大作用距离与发射功率的四次方根成正比, 即发射功率越大, 则作用距离越远。

同时从雷达的抗干扰要求出发, 也希望发射功率大。

厘米波雷达发射机由于应用多腔磁控管, 最大脉冲功率已达几十兆瓦, 分米波段若用多腔速调管, 脉冲功率可达上百兆瓦, 米波雷达发射机一般应用超短波真空三极管, 脉冲功率可达几兆瓦。随着人造卫星及洲际导弹的发展, 提高作用距离的要求使超高功率发射管的研制成为当前雷达技术发展的关键问题之一。

晶体管由于功率较小, 目前尚不能取代真空发射管。这是雷达全半导体化的主要障碍。

三、效率

效率是指雷达发射机的输出脉冲功率与输入直流功率之比。

由于发射机的输出脉冲功率很大, 故效率是一个重要指标。如果效率低, 则大量的电源功率就被白白浪费掉。提高发射机效率始终是改进发射机质量的一个重要方面。

一般真空三极管效率为 60%, 多腔磁控管效率为 40~50%, 而脉冲调制器效率为 60~70%, 故现有雷达发射机的全机效率一般小于 30%。

四、脉冲宽度

脉冲宽度 τ 越大, 则一个搜索脉冲中所包含的能量就越大, 因而雷达的作用距离也就越远, 这可以从式(1-2b)看出。

脉冲宽度 τ 越小, 则雷达能够分辨的最小距离 $\Delta S_{\min}$ 越小, 雷达的最小可测距离 $R_{\min}$ 越小(即“盲区”半径越小)。这是因为:

当两目标距离太近时, 目标 1 的回波后沿将与目标 2 的回波前沿混在一起, 以致无法分辨, 如图 1-8 所示。所以能够分辨的最小距离 $\Delta S_{\min}$ 应该满足下式:

$$\frac{2\Delta S_{\min}}{c} > \tau$$

亦即

$$\Delta S_{\min} > \frac{c\tau}{2} \quad (1-3)$$