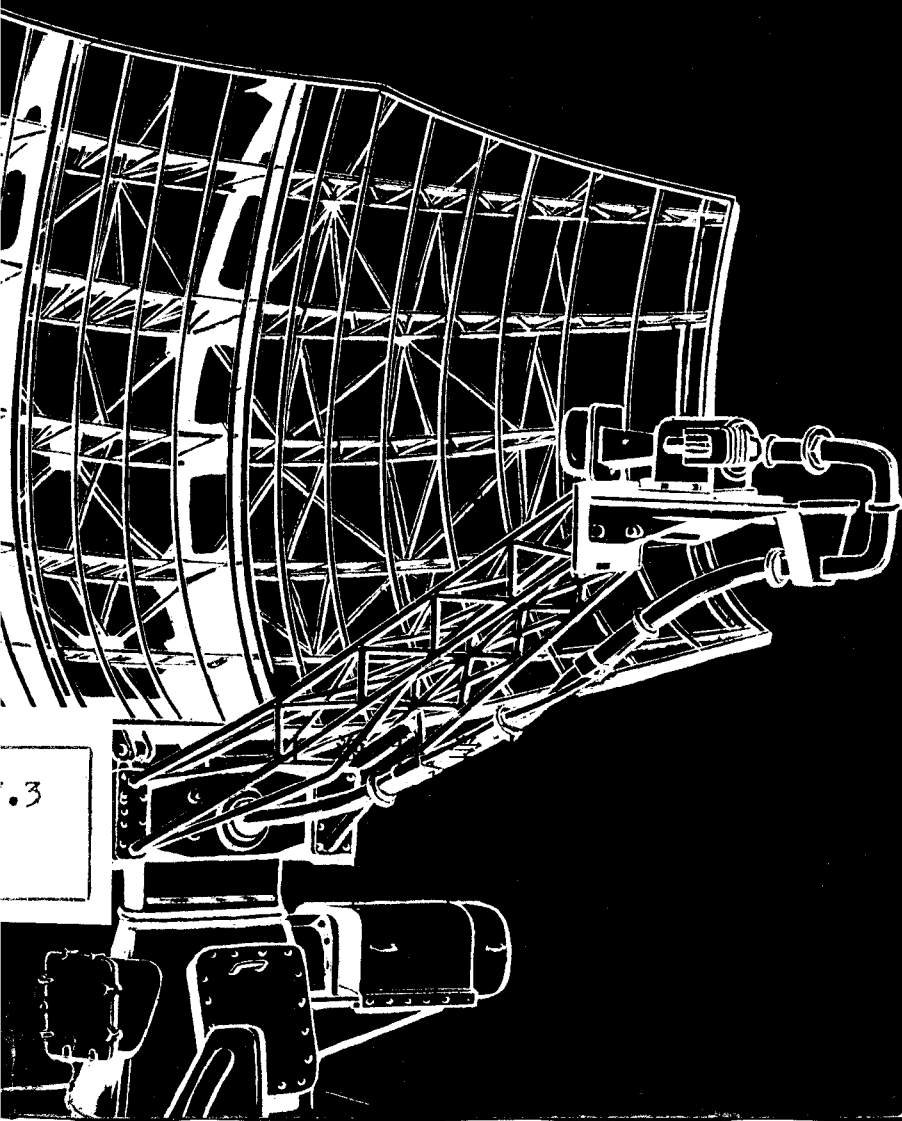


雷达发射机



内 容 提 要

《雷达发射机》内容包括雷达发射机组成、技术指标、微波发生器、刚性调制器、线型调制器、磁调制器、发射机整机设计、技术指标的测量、控制保护电路等。书中除系统的阐明了基本理论外,还较详细地介绍了工程设计计算、测试、调整等工程实际问题,并附有设计计算实例。

本书可供从事雷达专业的技术人员和高等院校有关专业师生参考,对从事大功率微波源的有关科技人员也有一定的参考价值。

雷 达 技 术 雷 达 发 射 机

《雷达技术》编写组

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 9.5 字数 250,000

1982年2月第1版 1982年2月第1次印刷

印数 1-2,800

统一书号: 15119·2161 定价: (科四) 1.10 元

前 言

《雷达技术》是一套中级技术读物，专为雷达专业的学生和从事雷达研制、生产、使用的技术人员提供雷达技术的一些基本知识。

《雷达发射机》是丛书中的一本，其重点放在研究、解决工程实践问题上，力求理论能联系实际，以帮助初次从事雷达发射机研制、生产、维修、保养的大专院校毕业生尽快掌握实际技能，同时也充分注意到理论分析的一面，以供工程技术人员参考。本书共分六章，内容有：雷达发射机组成、技术指标、微波发生器、刚性调制器、线型调制器、磁调制器、发射机整机设计、调试、控制保护电路等。

本书的编写得到了有关高等院校、工厂、研究所的大力支持，有关同志对本书的编写提供了不少的宝贵意见及参考资料，在此一并表示衷心感谢。本书最后由上海交通大学倪养华同志整理加工，上海科学技术大学王保华同志审阅定稿，由于我们的实践经验和理论水平有限，书中肯定会有不少缺点和错误，殷切期望广大读者和技术人员批评指正。

《雷达技术》编写组

1981年1月

目 录

第一章 雷达发射机概述

第一节	雷达发射机的任务和组成	1
第二节	雷达发射机的主要技术指标	3
第三节	雷达发射机的发展趋势	8

第二章 微波发生器

第一节	引言	11
第二节	速调管	13
第三节	行波管	21
第四节	磁控管	28
第五节	前向波管简介	48

第三章 刚性调制器

第一节	脉冲调制和脉冲调制器一般概念	49
第二节	刚性调制器概述	53
第三节	并联式阴极脉冲调制器的工作原理	53
第四节	并联式阴极脉冲调制器的波形分析	55
第五节	具有脉冲后沿改善线路的并联式阴极脉冲调制器	74
第六节	调制脉冲整形电路	79
第七节	并联式阴极脉冲调制器的充电电路	85
第八节	并联式阴极脉冲调制器的效率	93
第九节	调制开关	95
第十节	并联式阴极脉冲调制器的预调制器	105
第十一节	并联式阴极脉冲调制器的工程设计	112
第十二节	阴极脉冲调制器的其它型式	122
第十三节	调制阳极脉冲调制器	128
第十四节	撬棒	136

第四章 线型调制器

第一节	概述	139
第二节	利用长线实现电容储能和形成脉冲	140
第三节	人工线	146
第四节	人工线的充电电路	156
第五节	调制开关	166
第六节	高功率脉冲变压器	184
第七节	放电电路分析	189
第八节	负载不匹配对调制器工作的影响	202
第九节	线型调制器的实例分析	206
第十节	线型调制器的工程设计	208

第五章 磁脉冲调制器

第一节	概述	221
第二节	磁开关	222
第三节	交流电源馈电的磁脉冲调制器	229
第四节	交流磁调制器的工程设计	248
第五节	直流电源馈电的磁脉冲调制器	253
第六节	可控硅-磁混合型调制器	258
第七节	脉冲调制器小结	266

第六章 脉冲雷达发射机

第一节	雷达发射机的设计考虑	270
第二节	雷达发射机的电源供给	272
第三节	雷达发射机的控制保护电路	278
第四节	脉冲雷达发射机举例	282
第五节	脉冲雷达发射机技术指标的测量	291
第六节	雷达发射机对人体的有害影响及其防护	295

第一章 雷达发射机概述

第一节 雷达发射机的任务和组成

发射一种特定形式的电磁波，并借助电磁波的反射特性来探测目标的存在和确定其空间坐标(斜距、方位角、仰角或高度)以及运动参量(速度、加速度)、群目标的目标个数等，这正是雷达的基本工作原理。因此产生特定形式电磁波的发射机是雷达站中一个必不可少的重要组成部分。

雷达发射机产生一个载频受到调制的、功率很大的信号，经馈线至天线向空间辐射出去，便形成雷达的探测信号。探测信号的形式随雷达的战术、技术性能而各不相同，最常见的是一种矩形脉冲调制信号。用矩形脉冲调制信号作探测信号的雷达称之为脉冲制雷达。

脉冲制雷达中，雷达发射机的主要任务是产生一定重复频率和一定宽度的射频功率脉冲，脉冲雷达发射机的典型方框图如图1-1所示，图中还表明了发射机与其它组成部分的关系，它通常由预调器、调制器、振荡器等部分组成。预调器受定时器控制。定时器送出的触发脉冲一面“命令”发射机工作，同时又“通知”显示器开始扫描计时。故触发脉冲亦称为同步脉冲，它协调雷达各分机同步工作。预调器每受触发脉冲触发一次，便产生一个一定宽度的矩形控制脉冲——预调脉冲，此预调脉冲经调制器后变成一个强功率的脉冲(从这个意义来说，调制器实质上是一个脉冲强功率放大器)。在脉冲雷达中常见的调制器有刚性调制器、线型调制器和磁调制器三种。发射机中的振荡器，在米波段一般采用超短波三极管作振荡管，在分米波段则可应用超短波三极管或磁控管，而在厘米波雷达中多腔磁控管则是最常用的微波振荡管。振荡器产生大功率的高频振荡，它的振幅受调制脉冲控制，因而输出包络

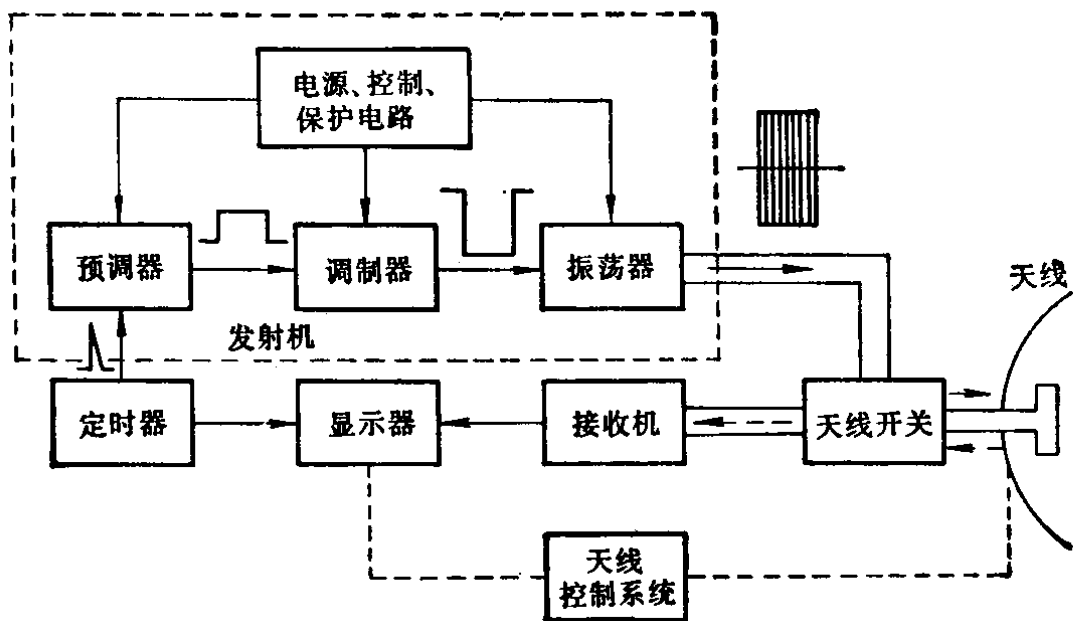


图 1-1 雷达发射机的组成方框图

为矩形脉冲的高频振荡。发射机各级的波形如图 1-2 所示，图中

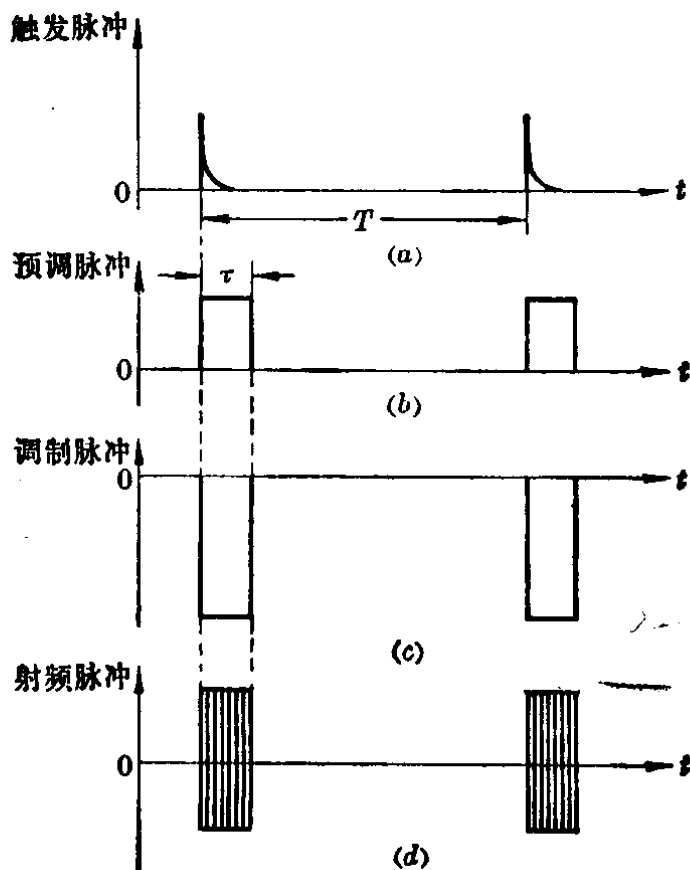


图 1-2 发射机各级波形

T 称为脉冲重复周期、 τ 称为脉冲持续期（脉冲宽度）。由于这种发射机只包含一级高频振荡器，所以也称为单级振荡式发射机。

单级振荡式发射机线路简单，经济可靠，但其缺点是频率稳定度较差（磁控管振荡频率的稳定度一般为 10^{-4} ，采用稳频装置及自动频率调整系统后也只有 10^{-5} ），难以形成复杂波形，相继的高频脉冲之间又不能相位相干，因此

它往往不能满足动目标显示雷达、脉冲压缩雷达等现代雷达的要求，在这些雷达中代之而起的是主振-放大式发射机。

主振-放大式发射机也称为相干式发射机，图 1-3 是其典型组

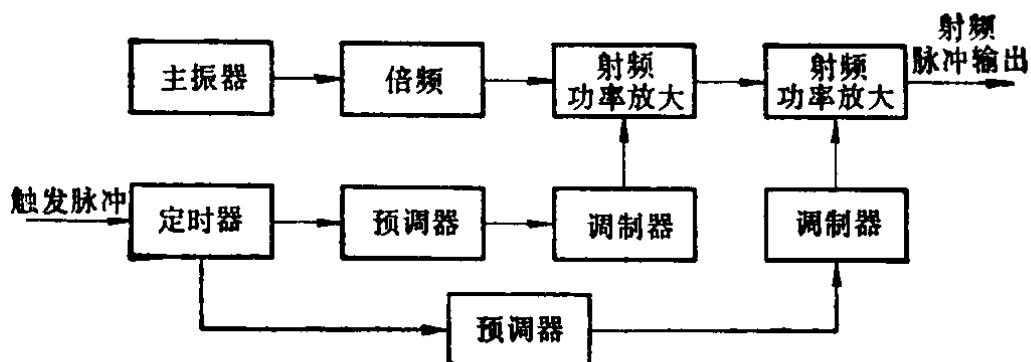


图 1-3 主振-放大式发射机的典型方框图

成方框图。为了获得具有足够高的频率稳定度(例如一般要求达到 10^{-7} 以上),则采用晶体振荡器作主振器。由于晶体振荡器的振荡频率低而功率小,因此需经若干级倍频器(或上变频器)才能形成频率很高的射频振荡。由于射频振荡是在低功率电平上形成的,所以易于形成复杂信号。为了提高信号的功率电平,主振-放大式发射机中需经若干级的射频功率放大,在射频功率放大的第一级常采用超高频三、四极管(米波和分米波段)和行波管(厘米波段),它用来推动末级大功率射频放大器,末级常用的管子有超高频三、四极管、多腔速调管和前向波管等。各射频功率放大器受到各自相应的脉冲调制器调制,而各调制器均由统一的定时器协调。显然,这种主振-放大式发射机线路复杂、制作困难而且代价高昂,故只是应用在一些特殊要求的雷达中。

第二节 雷达发射机的主要技术指标

不同用途的雷达对其发射机有着不同的技术要求,这些要求包括电气性能、结构、维修使用等各个方面。其电气技术指标主要有波长(工作频率)、发射功率、效率、脉冲宽度、脉冲重复频率、脉冲波形、频谱、工作稳定度(射频频率稳定度、脉冲参数稳定度、相位稳定度)等。这些技术指标大都由雷达总体设计所决定,发射机设计者的任务仅仅在于如何设法满足这些要求而不是独立地确定这些技术指标。现将发射机的指标及有关值得考虑的几个问题分述如下:

一、工作波长 λ

工作波长 λ 的选择, 需考虑下列几个因素。

1. 当天线波瓣形状确定后, 天线尺寸随波长的缩短而减小; 而当天线尺寸确定后, 工作波长越短, 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。

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, 但因为地面反射较强, 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, 但当波长短于三厘米时, 受空气、云、雨、雾吸收和反射的影响却较大。

3. 工作波长越短, 即工作频率越高, 则脉冲宽度可以选得越小, 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。

4. 对于各种用途的雷达发射机, 它们的工作波长应各不相同。

(1) 空用和海上雷达, 由于受到重量和体积的限制, 一般均选用厘米波段或毫米波段, 以利于减小天线的尺寸。

(2) 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, 以及方便阵地的转移, 天线也不宜过大, 因此波段也多选用在厘米波段或毫米波段。

(3) 警戒雷达, 要求作用距离远, 发射功率大, 因此多用米波和分米波段。若考虑到运输、维护、军事隐蔽等方面, 过长的工作波长, 过大的天线尺寸显然是不适宜的。

(4) 气象雷达, 一般选择对气象状态有强烈反射的厘米波波段。

现代雷达的工作频率一般不是单一的, 而是可以在一个相当宽的频带内无惯性地调谐或者跳频, 有的还可以在不同的频段内快速地跳变以提高雷达系统的抗干扰能力。这就要求发射机能产生不同频率的载频信号且能快速地改变。

二、发射功率 P

雷达发射机的功率主要取决于最大的作用距离, 最大作用距

离 $R_{\max}$ 由下列关系式决定:

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

式中 P_{τ} ——发射机的脉冲功率;

$P_{r\min}$ ——接收机所能接收的最小可辨功率;

S_b ——目标有效反射面积;

S_a ——天线有效面积;

D_a ——天线增益系数。

由式 1-1 可知,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。发射功率越大,则作用距离越远。从雷达的抗干扰要求出发,也希望本机的发射功率增强。厘米波雷达发射机应用多腔磁控管,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。

三、效率 η

效率是指雷达发射机的输出脉冲功率与输入的直流功率之比。发射机的输出脉冲功率很大,故效率若偏低,则大量的电源功率就将浪费,所以提高发射机的效率始终是改进雷达发射机质量的一个重要方面。多腔磁控管的效率为 40~50%,而脉冲调制器效率为 60~70%,故现有雷达的发射机全机效率通常在 30% 以下。

尽可能地提高效率不仅可以节约电能,而且对缩小发射机的体积、减轻其重量也有重大的贡献。

四、脉冲宽度 τ

脉冲宽度 τ 越大,则搜索脉冲中所包含的能量就越大,雷达的作用距离也就越远。但脉冲宽度越大,相邻两目标的分辨能力(即二目标间最小可辨距离 $\Delta S_{\min}$)就越差,这

是因为,若 τ 较大,而两目标距离又较接近时,如图 1-4 所示,目标 1 回波的后沿有可能与目标 2 回波的前沿相重叠,以致难

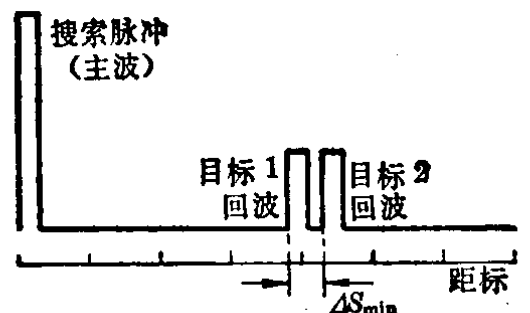


图 1-4 目标距离分辨力与脉冲宽度的关系

以分辨, 所以为了能分清相距为 $\Delta S_{\min}$ 的两个目标, τ 应满足下式:

$$\tau < \frac{2 \Delta S_{\min}}{C} \tag{1-2}$$

如 τ 确定后 $\Delta S_{\min}$ 的数值还受荧光屏光点尺寸的限制, 若光点半径较大, 则 $\Delta S_{\min}$ 值就难以缩小。

当目标距离雷达站很近时, 主脉冲的后沿将与目标回波前沿相重迭, 脉冲宽度越宽, 可能重迭的区域就越大, 因而最小可测距离 $R_{\min} \left(R_{\min} \geq \frac{C\tau}{2} \right)$ 增大, 显然这是造成所谓雷达“盲区”的原因之一。

必须指出, 雷达盲区实际上往往要比最小可测距离大得多, 发射功率越大越是如此, 这主要是接收机具有有限的恢复时间的缘故。

为了要提高雷达的距离分辨能力, 就应用较小的脉冲宽度, 但脉冲宽度的缩小, 受制于雷达的作用距离和雷达接收机的通频带的提高。因此, 脉冲宽度应根据雷达的用途而定, 一般警戒雷达需有较远的作用距离, 故脉冲宽度一般取得较宽, 通常可达几十微秒。而对炮瞄雷达来说, 对作用距离要求不很远, 而要求距离分辨能力较强, 故宜使用较窄的脉冲, 一般为微秒量级。

为了解决作用距离和距离分辨能力对脉冲宽度要求的矛盾, 使得雷达既能看得远, 又能清晰地分辨目标, 可采用宽脉冲发射以提高发射的平均功率, 保证足够的最大作用距离, 而在接收机中采用相应的脉冲压缩法, 获得窄脉冲以提高距离分辨力, 则是一个较好的方法。

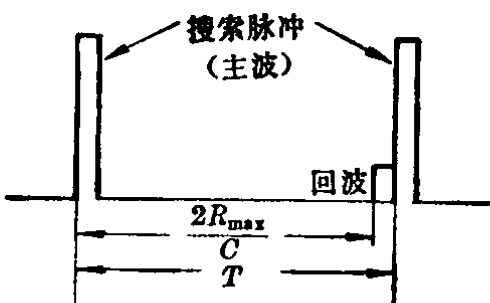


图 1-5 脉冲重复周期的决定

用相应的脉冲压缩法, 获得窄脉冲以提高距离分辨力, 则是一个较好的方法。

五、脉冲重复周期 T

脉冲重复周期 T 决定于所要求的最大作用距离 $R_{\max}$, 由图 1-5 所示的情况可以看出, 脉冲重复周期 T 应大于 $\frac{2 R_{\max}}{C}$, 一般取:

$$T = (1 + 25\%) \frac{2 R_{\max}}{C} \quad (1-3)$$

$$F = \frac{1}{T} = \frac{0.4C}{R_{\max}} \quad (1-4)$$

式 1-3 中给于 25% 的富余量是必要的, 这主要考虑到显示器中的扫描电路具有一定的回程时间。

脉冲制雷达中, 脉冲重复频率 F 一般取几百到几千赫, 重复频率越小, 重复周期越大, 可测的最大距离就越远, 但重复频率过低, 单位时间内的脉冲积累数就越小, 识别目标的能力就越弱, 故重复频率不宜过低。

雷达发射机中, 脉冲宽度和脉冲重复频率一般也必须是可变的, 借以保证不同量程时的分辨力和作用距离, 同时也有利于改善雷达的抗干扰能力。例如某航海雷达有窄 ($80 \text{ m}\mu\text{s}$)、中 ($0.2 \mu\text{s}$)、宽 ($0.5 \mu\text{s}$) 三档脉冲宽度, 相应的脉冲重复频率分别为 2 kHz (中、窄脉宽时) 和 1 kHz (宽脉冲时)。

六、信号波形与频谱

信号波形一般说来以矩形为最好, 这是因为:

1. 在一定的脉冲宽度下以矩形脉冲的能量为最大, 作用距离就较远。

2. 采用矩形脉冲, 因有陡直的前后沿, 计时精度较高, 使测距精度较高, 也容易分辨两个相邻的目标。

3. 矩形脉冲顶部平坦, 脉冲持续期中的发射功率和频率稳定。

在实际上, 脉冲总有一定的前后沿和顶部降落, 如图 1-6 所示。但应使脉冲前后沿尽可能陡些, 以提高雷达的测距精度和距离分辨能力。顶部降落也应控制在一定的范围

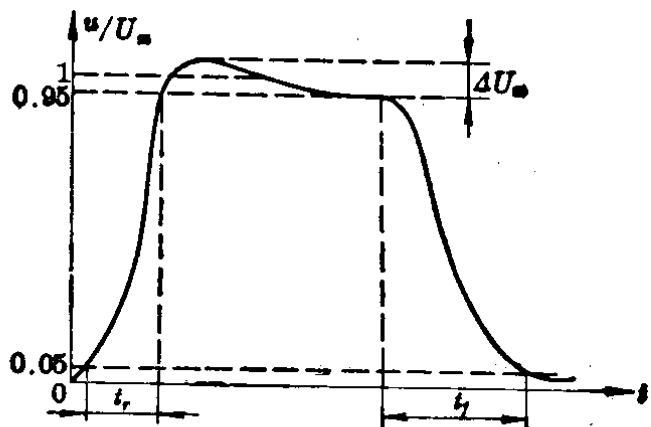


图 1-6 脉冲波形

围之内, 通常应使脉冲前沿 t_r 后沿 t_f 和顶部降落 ΔU_m 满足下列关

系式:

$$t_r \leq (0.1 \sim 0.2) \tau$$

$$t_f \leq (0.2 \sim 0.3) \tau$$

$$\delta\% = \frac{\Delta U_m}{U_m} \times 100\% \leq 5\%$$

观察信号的频谱是衡量发射机工作质量的最为有效的方法。矩形脉冲的频谱如图 1-7 所示, 其带宽甚宽, 而距中心频率 $\pm \frac{1}{\tau}$ 以外的频谱能量不但对接收机没有用处(因为接收机的带宽 B 通常选为 $\frac{1}{\tau}$), 相反是一个潜在的干扰源。因此, 如果可能, 应该把频谱占有减到最小, 这样就有利于频谱保存和兼容性。某些雷达已采取有效措施, 例如将脉冲前、后沿整形, 以使远离中心频率的频谱成分显著减小。

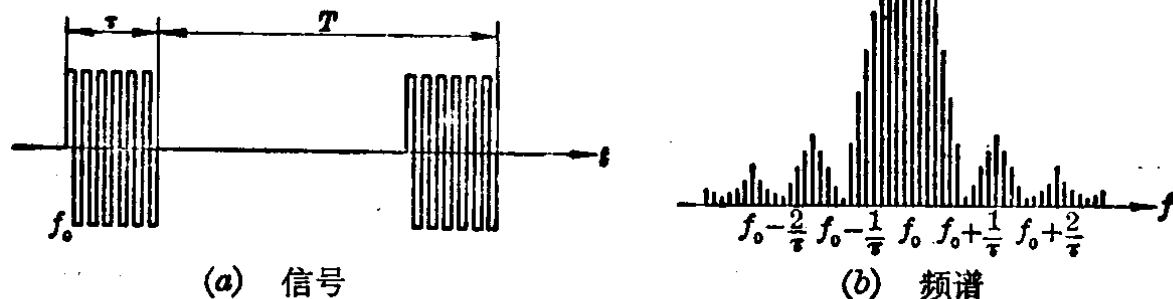


图 1-7 射频脉冲的频谱

必须指出, 某些现代雷达为了获取更多的目标信息, 雷达发射机的信号波形已不再是简单的脉冲列, 而可能是调频(或调相)脉冲、极短脉冲串等, 以满足测量精度、模糊度、分辨力和杂波鉴别等特定要求。

第三节 雷达发射机的发展趋势

自从雷达问世以来, 雷达发射机一直沿着下列几个主要方面发展。

一、开拓新的工作波段

新波段的开拓在很大程度上取决于发射技术, 尤其是新的高

频大功率元、器件的研制。随着高频大功率元、器件极限频率的不断提高,雷达的工作波段在逐渐扩展。现在,大多数雷达都工作在微波波段,其中最常用的是 S 波段(10 厘米波段)、 X 波段(3 厘米波段)。而 C 波段(5 厘米波段)、 K_u 波段(2 厘米波段)和 K_a 波段(8 毫米波段)是开拓不久的新波段。频率更高的毫米波、亚毫米波波段或激光,还存在着不少技术问题,特别是尚无法获得大功率,只能用于实验或某种特殊用途的雷达。

二、不断增强发射功率

雷达所需的平均发射功率最小的远小于 1 W, 而最大的可高于 1 MW。因为雷达的最大作用距离以及对抗有源干扰的能力直接取决于平均发射功率,所以高效率地产生高功率一直是雷达发射机的一个重要发展方向。现在的微波发射管的峰值功率在 S 波段已可高达 30 MW, 在 C 波段也可到达 1 MW 以上。尽管微波发射管的组合运用可以获得较大的功率输出,技术上也相当完善,但是它们无论在经济方面还是在使用维修方面都不及单管,因此,研制超高功率微波管仍为大家所重视,目前正向峰值功率高于 100 MW、平均功率高于 1 MW 的目标努力。

三、改善高频振荡的控制

不同用途的雷达需要提供的有关目标的信息是各不相同的,这也就规定了各种雷达所发射的射频信号的最佳形式也各不相同。现代雷达的发射波形除广泛使用的脉冲波外,还有调频连续波、调频(或调相)脉冲波,脉冲串等波形。这一切都要求改善对于高频振荡的控制,即改进调制方法以获得足够高的频率稳定性和特定的最佳波形。某些雷达还采用了双重调制,例如高频采用脉冲调制后再进行调频的双重调制方式。

四、实现发射机固态化

提高雷达发射机的固态化水平是一个极为重要的发展方向。随着半导体技术的不断完善,高压、大功率固态器件,例如硅整流堆、快速可控硅等已日益成熟,正越来越多地代替发射机中的电子、离子器件。近年来,大功率微波半导体器件也在迅速发展,其

最大功率容量已可达几个千瓦(限累二极管),从而出现了低发射功率的全固态雷达。此外,在相控阵雷达中,微波半导体器件也在和微波电子管进行强有力的竞争。但是,鉴于目前微波半导体器件的功率容量还远不及微波电子管,因此,在今后一段相当长的时间内,前者尚不可能完全取代后者作为大功率微波发射源。

第二章 微波发生器

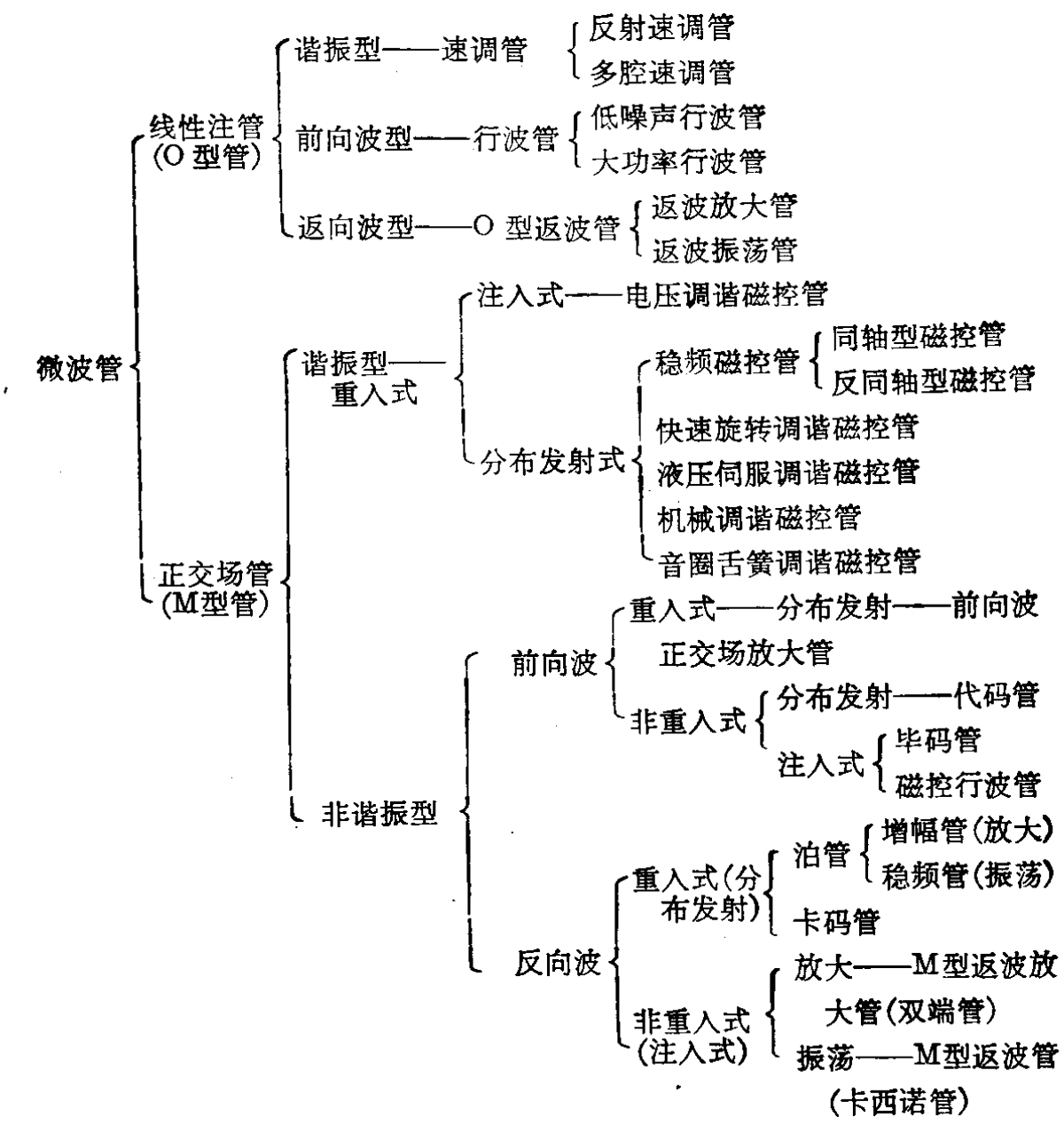
第一节 引言

在雷达发射机中,目前仍大量采用电真空器件,尤其是微波大功率电真空器件——微波电子管,因为这类器件的工作频率高、能承受的功率大,并具有高效率、高增益、宽频带、高稳定性及抗辐射性等一系列优点。目前工作频率低于 1000 MHz 的雷达发射机仍然广泛使用静电控制的超高频三、四极管,这种电子管的工作原理与常见的收信放大管、振荡管相似,只是为了适应较高频率的特点,在结构上作了特殊的改进,如孪生多极管、塔形管、金属陶瓷管等都属于这一类型。当工作频率提高到微波波段时,由于静电控制管存在有电子渡越效应,其输入电导随频率作平方律上升,从而导致其输出功率和效率急剧下降。为了克服电子惰性的有害影响,人们经过不断摸索,终于突破了静电控制的旧概念,在电子渡越过程中控制电子注的密度,使运动着的电子不断地把从直流电场中获得的动能转换成高频电磁能,变电子渡越效应这一不利因素为有利条件,这种全新的动态控制法正是一切微波管的工作基础。

最早的微波管是速调管和磁控管,以此为基础逐渐形成了微波管的两大分支:线性注管(O 型管)和正交场管(M 型管)。

O 型管的名称来源于法文 TPO (意为行波管),速调管、行波管等微波管均属此列。这些管子中电子注从阴极发射直至打到收集极为止,在相互作用空间内电子的运动轨迹基本上是线性的,故又称为线性注管。O 型管采用了与电子注同轴的直流磁场,以使电子注沿管子长度行进时能聚集在一起。其慢波结构使电子沿管体漂进时产生群聚,感应出强烈的高频场,形成一定的高频输出功率。

表 2-1 微波电子管分类一览表



M 型管的名称也是来源于法文 TPOM（意即磁控的行波管）。它也靠电子注与高频场相互作用进行能量交换来获得微波放大或振荡。其特点是直流电场与直流磁场的方向相互垂直，而且两者又都与电子注方向垂直，故这类管子常称为正交场微波管。磁控管、泊管、前向波管等微波管均属此列。

微波管的种类很多，表 2-1 列出了常用微波管的主要类型。微波管的合理选择不仅直接影响雷达发射机的各项性能指标，而且还会影响雷达系统的整机性能，诸如体积、重量等等。对雷达发射机的设计者来说，在微波管和调制器之间进行最佳的配合与折衷