

73 4632d
218
18

DG 46/14
· 雷达技术 ·

雷达接收机—高频设备

《雷达技术》编写组



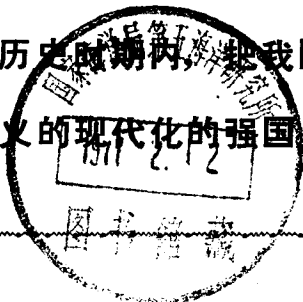
4006543

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。

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。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。



4006543

前 言

在毛主席的革命路线指引下,教育革命和工业技术革新、技术改造的形势大好。根据广大工农兵读者和技术人员的迫切要求,上海有关的工厂、部队、院校和研究所组织了由工人、解放军战士、技术人员和教师组成的三结合编写组,拟在若干年内陆续出版一套《雷达技术》。

《雷达接收机》分上下两册出版。上册为中、视频设备,包括雷达接收机中的视频放大器、检波器、中频放大器和自动增益控制等内容。在介绍各电路之前,先介绍了有关信号与噪声的分析和接收机的技术指标。下册为高频设备,包括变频器、固体微波振荡器及倍频器、自动频率微调、低噪声微波放大器、几种常见的雷达体制及雷达接收机的设计和测试等内容。为便于读者阅读,在讨论各章之前,补充了一些常用的高频元件的基本知识。本书附录中还介绍了几种微波集成电路。

《雷达技术》是一套中级技术读物,目的是为雷达技术专业的工农兵学员和从事雷达研制、生产和使用的工农兵读者提供雷达技术的一些基本知识。由于我国半导体技术和雷达技术的迅速发展,新型的器件和电路层出不穷,故不能将所有雷达的电路纳入本书内容。

遵循伟大领袖毛主席关于“教材要彻底改革”的教导,本书三结合编写组开展了革命的大批判,批判刘少奇、林彪所散布的卖国投降主义、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,力求使本书具有革命性、实践性和先进性。

在本书的编写过程中,得到了上海、南京等地的工人、技术人员、教师的大力支持和热情帮助,许多工厂、院校和研究所参与了本书的审稿和定稿工作,并提出了许多修改意见,对我们修正错误,提高书稿质量起了十分有益的作用,在此表示衷心感谢。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,殷切期望广大工农兵读者和技术人员提出批评建议。

《雷达技术》编写组

1975年11月

目 录

第一章 雷达接收机高频设备概述

1-1 雷达的工作波段	1
1-2 厘米波雷达接收机高频设备的组成	2
1-3 对厘米波雷达接收机高频设备的要求	8

第二章 高频元件

2-1 高频传输线	11
2-2 波导	30
2-3 谐振腔	42
2-4 波导分支与定向耦合器	56
2-5 雷达接收机中的天线开关	72

第三章 变频器

3-1 概述	91
3-2 混频晶体二极管	96
3-3 晶体二极管变频器的—般理论	107
3-4 单端式混频器	124
3-5 平衡式混频器	132
3-6 反射速调管本机振荡器	148

第四章 固体微波振荡器和倍频器

4-1 概述	156
4-2 微波晶体三极管振荡器	159
4-3 雪崩二极管振荡器	163
4-4 体效应二极管振荡器	182
4-5 阶跃恢复二极管倍频器	209

第五章 自动频率微调

5-1 概述	224
5-2 误差信号产生器——鉴频器	227
5-3 控制电路(调整电路)——自动频率微调系统的工作原理	237
5-4 自动频率微调设备典型线路介绍	257
5-5 自动频率微调系统的设计步骤	260
5-6 自动频率微调系统的调整	262

第六章 低噪声微波放大器(高频放大器)

6-1 引言	270
6-2 隧道二极管放大器	271
6-3 参量放大器	287

第七章 几种常见的雷达体制

7-1 单脉冲制雷达	326
7-2 圆锥扫描制雷达	336
7-3 脉冲压缩制雷达	341

第八章 雷达接收机的设计和测试

8-1 雷达接收机的设计步骤	257
8-2 厘米波雷达接收机举例	360
8-3 雷达接收机灵敏度的测试	366
8-4 雷达接收机的常见故障及其排除	374
附录: 雷达接收机中的几种常见微波集成电路	377

第一章 雷达接收机高频设备概述

1-1 雷达的工作波段

目前无线电波按频率或波长的大致划分如表 1-1 所示。电磁波的频率 f 和波长 λ 间的关系为：

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1-1)$$

式中 c —— 电磁波在自由空间(真空或未电离的空气中)传播的速度, $c = 3 \times 10^8$ 米/秒。

因此,知道电磁波的频率后,就可求得相应波长的大小。例如频率为 50 赫的工业用电,其波长为 6000 公里;频率为 990 千赫的

表 1-1 电磁波的分类表

按波长划分的名称	波长范围	频率范围	按频率划分的名称	主要应用
超长波	30~15km	10~20kHz	超低频	长距离通讯
长波	15~3km	20~100kHz	低频	长距离通讯、导航
中波	3000~150m	100~2000kHz	高频	广播、导航、海军通讯
短波	150~10m	2~30MHz		中、长距离通讯
超短波	10~1m	30~300MHz	特高频	短距离通讯、电视、雷达、飞机导航
微波	分米波	1~0.1m	超高频	短距离通讯、雷达、电视
	厘米波	10~1cm		雷达、导航、中继通讯
	毫米波	10~1mm		30~300kHz

无线电广播,其波长为 330 米;频率为 3000 兆赫的雷达,其波长为 10 厘米等等。

雷达通常是工作在特高频或超高频范围内的。特高频波段通常指频率从 30 兆赫到 300 兆赫的范围,相应的波长为 10 米到 1 米,称超短波或米波。超高频范围很广,从 300 兆赫到 300000 兆赫,包括分米波(频率从 300 兆赫到 3000 兆赫)、厘米波(频率从 3000 兆赫到 30000 兆赫)和毫米波(频率从 30000 兆赫到 300000 兆赫)。分米波、厘米波和毫米波总称微波。目前应用得最广的雷达是微波雷达。按雷达工程的习惯微波波段的划分如表 1-2 所示。

表 1-2 雷达波段划分表

波段代号	简称	波长范围 cm	频率范围 MHz	主要应用
P		130~75	225~400	预警
L	22cm 波段	75~15	400~2000	警戒、制导、导航
S	10cm 波段	15~7.5	2000~4000	炮瞄、测高、制导
C	5cm 波段	7.5~3.65	4000~8200	测高、导航、跟踪
X	3cm 波段	3.65~2.42	8200~12400	炮瞄、导航、气象
Ku	2cm 波段	2.42~1.66	12400~18000	炮瞄、导航、气象
K	1.25cm 波段	1.66~1.13	18000~26500	导航、气象
Ka	0.8cm 波段	1.13~0.75	26500~40000	导航、气象
Q-W	0.4cm 波段	0.75~0.375	40000~80000	

由于波段不同,雷达接收机的高频设备的结构也有很大差异。本书主要介绍工作在厘米波波段的雷达接收机高频设备。应当指出,工作在 1000 兆赫到 3000 兆赫的分米波接收机,其高频设备的结构与厘米波接收机高频设备相似。

1-2 厘米波雷达接收机高频设备的组成

雷达接收机的高频设备是指从主馈线(发射机到天线间的馈

线)到中频放大器之间的所有接收机部件的总合。

最简单的厘米波超外差式雷达接收机方框图如图 1-1(a) 所示。图中用虚线框出的部分就是高频设备,它包括馈线(接收机分支)、天线收发转换开关中的接收机放电器、混频器和本机振荡器。接收机放电器的作用是不使发射机所发出的搜索脉冲进入接收机,以免接收机过载或损坏,但是不阻碍回波信号进入接收机。混频器与本机振荡器(合称变频器)的作用是把接收到的射频信号变换成中频信号。中频信号经中频放大器放大并加到检波器的输入端。由检波得到的视频脉冲,经视频放大器放大,最后送至雷达显示器。为了可靠地接收信号,雷达接收机中常具有自动频率微调(A.F.C.)系统,它的作用是在发射机和接收机本机振荡器频率不稳时,始终保持两者的差值等于中频,也就是自动调节本机振荡频

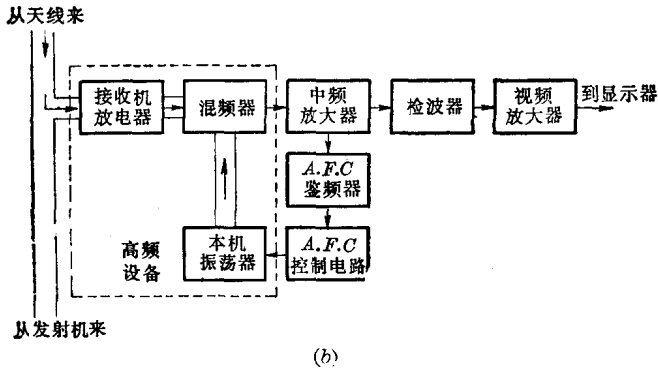
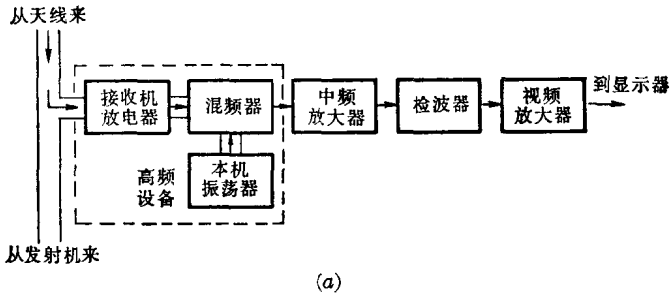


图 1-1 简单的厘米波雷达接收机方框图

率去跟踪发射机频率的变化。图 1-1(b) 所示为简单的单路自频调系统, 采用这样的系统, 在高频设备中不需另添新的部件。

图 1-2 是一具最简单的厘米波雷达高频系统的结构示意图。图中, 用矩形波导作为馈线, 在天线旋转关节处则嵌入一段硬同轴线。磁控管发射机和接收机高频设备通过 $E-T$ 分支接头与主馈线相联。发射时, 接收机放电器在磁控管所发的强大的搜索脉冲的作用下打火, 把接收机通道关闭, 微波能量就沿主馈线通过旋转关节、 E 面弯曲波导和裂缝天线辐射到空间。接收时, 天线收到的回波信号沿主馈线反向传输。由于回波功率很小, 不足以使接

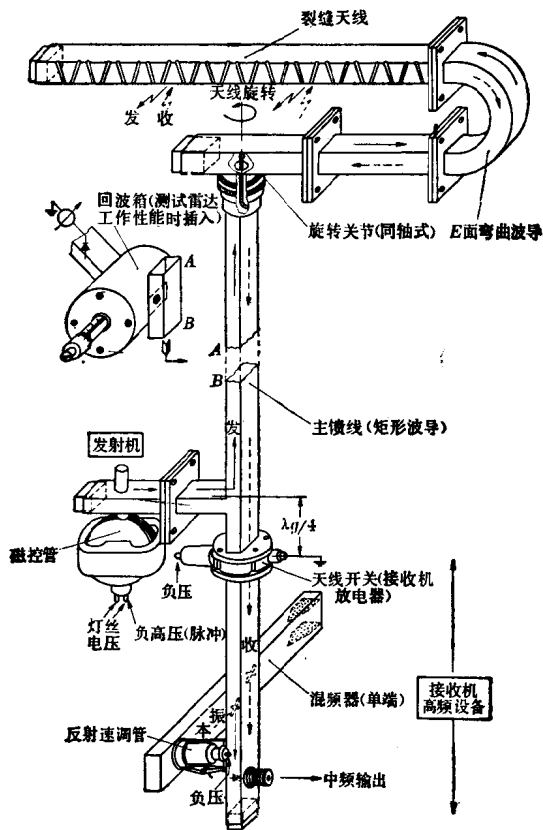


图 1-2 某导航雷达高频设备结构示意图

收机放电器打火，所以它就穿过放电器作用到由十字槽定向耦合器和晶体二极管组成的单端混频器上。回波信号与反射速调管产生的本机振荡信号在混频晶体上相差拍，就产生出中频信号。然后用同轴电缆把中频信号送给前置中频放大器。

现在应用较多的典型的厘米波雷达接收机的方框图如图 1-3 所示。这种接收机的高频设备的特点之一是具有高频放大器。采用高频放大器的目的主要是提高接收机的灵敏度，增大雷达的作用距离。这种接收机的另一特点是具有独立的自动频率微调支路，包括功率衰减器、混频器、中频放大器、鉴频器和控制电路等部分，这样就使高频设备变得复杂一些。

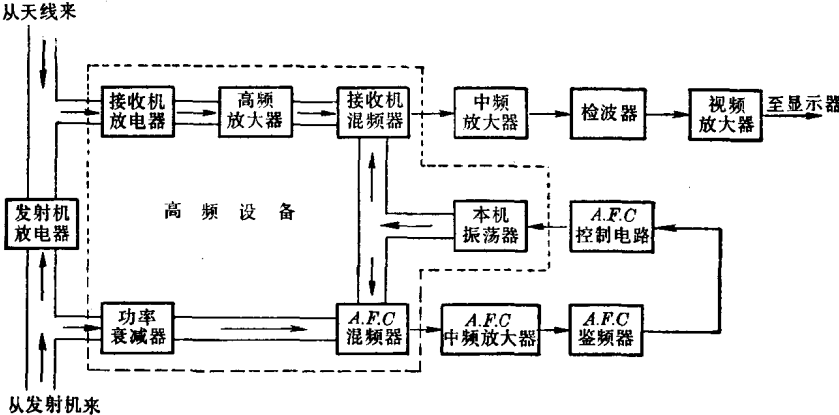


图 1-3 典型的厘米波雷达接收机方框图

作为一个实例，图 1-4 画出了一种具有独立自频调支路的厘米波雷达接收机的结构方案。这部接收机的高频设备包括波导馈线、由孪生放电管和 3dB 波导桥组成的平衡式天线开关、3dB 波导桥平衡混频器和反射速调管本机振荡器。自频调系统包括与主馈线耦合的十字槽定向耦合器、功率衰减器、3dB 波导桥平衡混频器和自频调控制电路(鉴频器在内)。

由微波辐射场这一固有特点所决定，不能用一般开敞的传输线来作微波雷达的馈线。因此在分米波雷达中多用硬同轴线作馈

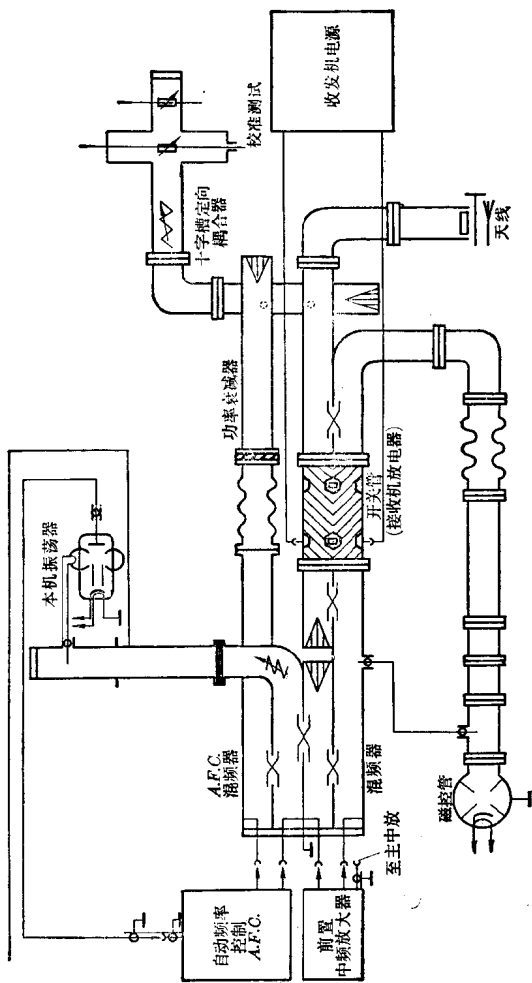


图 1-4 具有独立 A. F. C. 支路的厘米波雷达接收机结构示意图

线,而在厘米波雷达中则用矩形波导。但是为了小型化的需要,现在也用介质基片上的微带线来作雷达接收机的馈线。

对于雷达的工作来说,天线收发转换开关十分重要。由于雷达发射机和接收机共用一架天线,就必须适时地自动切断或接通接收机支路,否则发射时漏过来的搜索脉冲功率就能使接收机各级严重地、长期地过载(阻塞),因而妨碍近距离目标回波接收,如果漏过来的功率很大,还会直接损坏接收机元件(不到1瓦的功率就足以使晶体混频器损坏或质量显著变坏)。另一方面,在接收时如果不切断发射机通路,就有一部分回波功率漏到发射机去,而使接收机的灵敏度降低。长期以来使用的天线开关是气体放电器件,目前已能用铁氧体环流器与半导体功率限幅器相组合做成固体化的天线开关。

高频放大器要起到降低接收机噪声系数,提高接收灵敏度的作用,它自身必须是低噪声的微波放大器。过去主要使用低噪声行波管,这种放大器要用高压电源和聚焦系统,因而比较庞大。现在已采用参量放大器、隧道二极管放大器等固体化的放大器。这对于高频设备的小型化有很大的意义。

混频器的作用是频率变换,从原理上讲任何非线性元件都能起这种作用。在米波与分米波波段,可以应用真空三极管、晶体三极管和真空二极管。但是到了厘米波波段,上述这些器件都变得效率低而噪声大,因此只能应用晶体二极管。过去传统使用的是点接触晶体二极管,现在已使用表面势垒二极管(又称肖特基势垒二极管或热载流子二极管)。后者不但变频损耗小、噪声低,而且可靠性高,便于集成,所以发展迅速。混频器电路有单端式和双端式(平衡式)两类。为了减小本机振荡噪声,现在主要应用平衡式混频器。

本机振荡器是小功率(毫瓦级)连续波微波振荡器。为了实行自动频率微调,它应具有良好的电调谐性能。长期来使用的是反射速调管。近几年来发展了各种固态微波源,其中最最有希望的是体效应二极管振荡器,目前研制较多。

我国工人阶级、人民解放军和革命知识分子，响应伟大领袖毛主席关于“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”的号召，坚持“独立自主、自力更生”和“打破洋框框，走自己工业发展道路”的方针，为了加强国防建设，巩固无产阶级专政，支援世界革命，正在多、快、好、省地发展我国的雷达工业，在雷达接收机高频设备固体化、集成化方面已经取得了许多可喜的成就。

为了帮助从事雷达接收机高频设备研制、生产的广大工人群众掌握这一技术，本书将逐步讲述雷达接收机的馈线、天线开关、高频放大器、混频器、本机振荡器和自动频率微调系统、雷达接收机的设计和测试、几种常见的雷达接收机体制，书末附录介绍一些微波集成电路在雷达接收机中的应用。在讲述高频设备的各部件时，以介绍半导体器件为主，同时兼顾目前仍广泛使用的电真空器件，如气体放电开关管、反射速调管等等。为使广大读者能由浅入深地逐步学习所述内容，在第二章中补充了一些传输线和微波元件的基本知识。

1-3 对厘米波雷达接收机高频设备的要求

对厘米波雷达接收机高频设备的要求主要有各点：

- (1) 噪声系数要尽量小，以保证接收机有足够高的灵敏度。
- (2) 接收机放电器和中频放大器输入电路的通频带应足够宽，以使接收机的总通频带满足要求。
- (3) 从接收机放电器漏到混频器的发射脉冲功率必须很小，以免接收机过载或混频晶体被烧毁。
- (4) 高频设备各部件的调谐应该足够稳定。为了正常地接收信号，必须随时使信号频率 f_s 与本机振荡频率 f_o 之差恰等于中频 f_0 。但在厘米波波段，尤其是在频率高至10000兆赫左右时，往往很难做到这一点。在这种情况下，就应当采用自动频率微调系统。

在上述各要求中，哪一个是最主要的？这是必须关注的问题。

雷达接收机最重要的指标是灵敏度，而灵敏度的高低取决于整机噪声系数的大小。这可由下式看出：

$$P_{s \min} = K T \Delta f N_F D \quad (1-2)$$

式中 $P_{s \min}$ ——接收机的最小可辨信号功率。此功率越小，则接收机越灵敏；

K ——玻尔兹曼常数， $K = 1.38 \times 10^{-23}$ 焦耳/度；

T ——标准温度(°K)， $T = 290\text{K}$ (17°C)；

Δf ——噪声通频带，约等于接收机的整机通频带；

D ——识别系数，指信号刚能识别时，接收机线性部分输出端的信号噪声功率比，一般取 $D = 1$ ；

N_F ——接收机的噪声系数。

噪声系数 N_F 的定义是网络输入端信号噪声功率比 $\frac{S_i}{N_i}$ 与输出端信号噪声功率比 $\frac{S_o}{N_o}$ 之比：

$$N_F = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} \quad (1-3)$$

如果网络存在内部噪声，则网络输出端的信噪比就比输入端的小，故 $N_F > 1$ 。 N_F 越接近于 1，反映网络的内部噪声越小。

由式(1-2)可知，接收机的噪声系数越小，其灵敏度就越高。

雷达接收机是由多级网络级联而成的，其整机噪声系数由各级的噪声系数和匹配功率传输系数决定，用如下的级联噪声方程描述：

$$N_F = N_{F1} + \frac{N_{F2} - 1}{K_{P1}} + \frac{N_{F3} - 1}{K_{P1} K_{P2}} + \dots \quad (1-4)$$

式中 N_{F1} 、 N_{F2} 和 N_{F3} ——分别是第一级、第二级和第三级的噪声系数；

K_{P1} 、 K_{P2} ——分别是第一级和第二级的匹配功率传输系数。

如果接收机没有高频放大级(图 1-5)，则馈线和天线开关是第一级，变频器是第二级，前置中频放大器是第三级。由于馈线

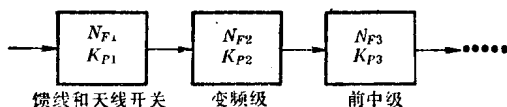


图 1-5 没有高放级的接收机

和天线开关是无源四端网络，其输入端与输出端信噪比相等，故 $N_{F1}=1$ 。它们的功率损耗又很小，即 $K_{P1} \doteq 1$ 。这样，从级联噪声方程可以看出，接收机总噪声系数主要取决于变频级，其次取决于前中级：

$$N_F \doteq N_{F2} + \frac{N_{F3} - 1}{K_{P2}}$$

变频器噪声系数越小，功率传输系数越大，前中级噪声系数越小，接收机噪声系数就越小。当然，若馈线和天线开关的损耗变大 (K_{P1} 减小)，那接收机的噪声系数就会增大。

如果接收机具有高频放大级，则馈线和天线开关是第一级，高频放大器是第二级，变频器是第三级。根据同样的分析可知，接收机总噪声系数主要取决于高放级，其次取决于变频级：高放级噪声系数越小，功率传输系数(功率增益)越大，变频器噪声系数越小，接收机噪声系数就越小。

鉴于变频器的噪声系数一般远大于放大器的噪声系数，因此我们希望在变频器之前加接功率增益足够大而噪声系数又远比变频器小的高频放大器去压抑变频器的内部噪声，以获得很小的整机噪声系数。通常，采用高频放大器能将接收机噪声系数降低 2~5dB。在没有高频放大器时，信号自天线经混频器到中频放大器前几级，信号都是很弱的，高频设备各部分及中频放大器的内部噪声都容易显露出来，这样就加重了减小高频设备各级内部噪声的任务。

减小雷达接收机整机噪声系数的重要性和途径已如上述。后续各章的分析将要告诉我们，小的噪声系数和大的传输系数构成了雷达接收机高频设备中的主要矛盾。我们要用全力分析这一对矛盾，“捉住了这个主要矛盾，一切问题就迎刃而解了。”

第二章 高频元件

2-1 高频传输线

雷达设备中的高频传输线(馈线)的任务是把发射机产生的大功率搜索脉冲传至天线,同时将天线接收下来的极微弱的回波信号送至接收机的输入端。为此,对高频传输线的要求是:

(1) 传输损耗应尽量小,否则将使发射脉冲功率降低以及使回波信号过多地被削弱,从而直接影响雷达的作用距离。

(2) 传输线的功率容量要大,防止在搜索脉冲功率很大时,传输线被击穿。

(3) 信号通过传输线时,反射的能量应尽可能小,即传输线有良好的匹配。

(4) 在雷达的整个工作频段内,应正常工作。

另外,还要照顾到传输线体积的大小,太笨重的传输线是不适用的。

在雷达设备中,传输线的型式主要有平行双线、同轴线和波导。根据上列要求,这些传输线各有一定的适用范围。波导比硬同轴线制造简单,损耗小,最大容许传输功率大,但体积较大,在频率较低时显得笨重(因波导截面尺寸与波长成正比)。这样一般在频率低于4000MHz时使用硬同轴线,而频率高于4000MHz时使用波导。软同轴电缆因损耗大,功率容量小,只用来联接变频器与前置中频放大器。平行双线仅用于米波雷达。但由于平行双线是研究雷达高频设备的基础,所以我们仍先从平行双线着手讨论。

一、电磁波沿传输线的传播

图2-1是直流供电情况下电磁场沿双线传输线传送的情况,图中, R_L 是其负载。