

711测雨雷达原理和维修

许国仁 叶安健 丁荣安 编著



气象出版社

711测雨雷达原理和检修

许国仁 叶安健 丁荣安

气象出版社

内 容 简 介

本书系统地讲述了711测雨雷达的工作原理和检修等方面的基本知识。全书共分十四章。第一章简要地介绍了711测雨雷达的工作概貌；第二章至第十章对711测雨雷达各部分的工作原理、实际电路和测量方法作了详细讨论；第十一章主要介绍整机联系；第十二章介绍配发的测试仪表；第十三章介绍711测雨雷达的架设、拆收、标定和性能参数的测定；第十四章介绍雷达的检修知识；书末还附有711测雨雷达的故障检修参考资料、图册资料和元件符号表。

本书内容通俗易懂，侧重用物理概念阐明问题，并作必要的计算。可供从事测雨雷达的机械、教学和生产人员阅读。

711测雨雷达原理和检修

许国仁 叶安健 丁荣安

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

中国人民解放军空军气象学院印刷厂印装

* * *

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经售

开本：787×1092 1/16 印张：33.25 字数：550千字 印数：1—3,000

1983年5月第1版 1983年5月第1次印刷

科技新书目23—90 统一书号：13194·0061 定价：3.50元

前 言

本书开始编于1974年。这次正式出版，根据编者的教学体会和一些雷达站的使用经验，作了较大的修改、补充和校订，特别是增添了必要的计算内容。本书对原理阐述力求文字通俗，简明易懂，概念明确，重点突出。在测调维修方面，侧重于介绍雷达的检修方法，并附有一般常见故障检修实例和部分疑难故障分析，因此适合于从事气象雷达实际工作的同志自学和检修时参考。

由于编者的学识和经验有限，本书虽经修改、校订，但不妥和错误恐仍难免，至盼读者多提意见，以便改正。

编者

1981.5

目 录

第一章 711测雨雷达概述	(1)
§ 1 711测雨雷达的用途和基本工作原理	(1)
§ 2 711测雨雷达的组成及概略工作过程	(7)
§ 3 711测雨雷达的主要性能	(8)
§ 4 711测雨雷达的结构特点和开关机步骤	(11)
第二章 发射机	(18)
§ 1 概述	(18)
§ 2 触发脉冲产生器和预调器	(19)
§ 3 调制器	(23)
§ 4 磁控管振荡器	(26)
§ 5 发射机电源	(36)
§ 6 发射机的结构和检查	(38)
第三章 天线波导系统	(41)
§ 1 天线波导系统的组成及概略工作过程	(41)
§ 2 天线	(41)
§ 3 波导系统	(44)
第四章 接收机	(52)
§ 1 概述	(52)
§ 2 平衡混频器	(58)
§ 3 前置中频放大器	(79)
§ 4 中频衰减器	(86)
§ 5 主中频放大器	(88)
§ 6 自动频率控制器	(91)
§ 7 控制盒	(109)
§ 8 接收机电源	(112)
§ 9 接收机的检查和调整	(114)
第五章 距离显示器	(117)
§ 1 概述	(117)
§ 2 静电式示波管及其附属电路	(120)
§ 3 粗扫描电路	(128)
§ 4 精扫描电路	(139)
§ 5 视频信号放大器和距标活动方波混合器	(142)
§ 6 距离显示器的结构、调整和示波管的拆装	(143)
第六章 分频器	(145)
§ 1 分频器的组成和概略工作过程	(145)
§ 2 距标产生电路	(146)
§ 3 200 赫触发脉冲产生器	(154)
§ 4 分频器的调整	(157)
第七章 平面显示器	(158)

§ 1	概述	(158)
§ 2	磁式示波管及其附属电路	(160)
§ 3	扫描电路	(166)
§ 4	信号距标混合电路和零度标志产生电路	(176)
§ 5	平面显示器的结构、调整和示波管的拆装	(179)
第八章 高度显示器		(183)
§ 1	概述	(183)
§ 2	距离扫描电路	(193)
§ 3	高度扫描电路	(196)
§ 4	限制电路	(201)
§ 5	活动高标方波电路和地曲补偿电路	(204)
§ 6	高标视放截断电路和辉亮方波电路	(211)
§ 7	高度显示器的结构和调整	(215)
第九章 显示器电源部		(221)
第十章 天线控制器		(227)
§ 1	概述	(227)
§ 2	可控硅和单结晶体管介绍	(228)
§ 3	天线方位控制部分的电路和工作原理	(238)
§ 4	天线传动装置	(248)
§ 5	天线位置指示装置	(250)
§ 6	天线控制器和天线位置指示装置的检查、调整和同步机的拆装	(261)
第十一章 整架联系		(263)
§ 1	配电电路及其附属电气设备	(263)
§ 2	控制面板和工作台	(272)
§ 3	各分机间的线路连接	(274)
第十二章 测试仪表		(278)
§ 1	500 型复用表	(278)
§ 2	ZC25-3 型兆欧表	(287)
§ 3	SBM-3 型脉冲示波器	(291)
§ 4	回波箱	(301)
第十三章 架设和标定		(306)
§ 1	雷达架设地点的选择	(306)
§ 2	雷达的架设	(306)
§ 3	雷达的标定	(309)
§ 4	性能测量	(312)
第十四章 711 测雨雷达的检修		(317)
§ 1	检修的基本知识	(317)
§ 2	单级电路的检修	(321)
§ 3	发射机的检修	(331)
§ 4	接收机的检修	(333)
§ 5	距离显示器的检修	(338)
§ 6	分频器的检修	(341)
§ 7	平面显示器的检修	(344)
§ 8	高度显示器的检修	(347)

§ 9	显示器电源部的检修·····	(357)
§ 10	天线控制器的检修·····	(359)
§ 11	位置指示电路的检修·····	(361)
§ 12	整机故障的检修·····	(362)
附录一	711 测雨雷达故障检修参考资料·····	(366)
附录二	变压器电性能数据·····	(381)
附录三	各电机及主要线圈正常电阻数据·····	(385)
附录四	711 雷达元件符号表·····	(386)
附录五	711 雷达图册资料·····	(387)

第一章 711测雨雷达概述

测雨雷达是利用物体对电磁波的散射作用来对云、雨、雪、雹等进行观测的。当雷达天线发射出去的电磁波在空间传播时，若遇到云、雨、雪、雹等目标物，就有一部分辐射能会被反射回来，并被雷达天线接收。这时在显示器的荧光屏上就会出现许多明亮不等的区域，即云、雨、雪、雹等的回波图象，简称气象回波。所以，用测雨雷达可以随时提供几百公里范围内云和降水的分布、结构等气象情报。

目前，我国已自行设计制造了多种测雨雷达。711测雨雷达就是其中的一种。

711测雨雷达的波长为3.20厘米。采用圆抛物面天线，其波瓣宽度小于1.5度。脉冲峰值功率为75瓩。最大探测距离为300公里。伺服系统采用可控硅。全机配有三个显示器，即平面位置显示器、距离显示器和高度显示器，其中平面位置显示器可以全面观测云、雨、雪、雹等的平面分布、结构、移向、移速和强度变化；距离显示器进行辅助，高度显示器可以观测云顶、云底高度以及云的垂直结构等。平面位置显示器和高度显示器合用一个磁性示波管，这不仅便于工作，而且使整机体积减小。由于711测雨雷达具有体积小，重量轻，机动性强，维修方便等优点，所以它不仅可以固定安装在气象台站进行观测，而且也可车载进行流动观测。它作为气象探测工具，在工农业生产中正在起着重要的作用。

§ 1 711测雨雷达的用途和基本工作原理

711测雨雷达用来测定200公里范围内空间的云、雨、雪、雹等（简称积雨云层）的距离、方位、高度，以及云层的厚度。对于200—300公里范围内的积雨云层，能测出距离和方位。

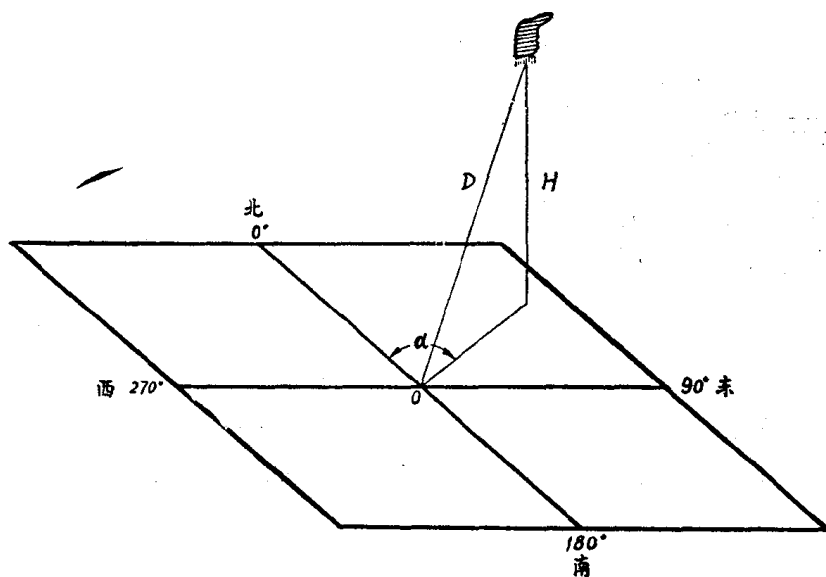


图1.1 目标的位置

711测雨雷达是怎样测定积雨云层的距离、方位和高度的呢？大家知道，目标的斜距 D 、方位角 α 和高度 H ，这三个数据都是以雷达所在的位置为原点来计量的，如图1.1所示。图中原点 O 为雷达所在的位置，斜距就是目标与雷达之间的直线距离 D （简称距离），方位角就是目标与正北方位之间的夹角 α （简称方位）规定以正北方位作为起始方位（0度），在水平面上按顺时针方向划分为360度。如果目标在正东方向，那么方位角就是90度。高度是指目标到地面的垂直距离 H 。

我们之所以能够用雷达来探测云、雨、雪、雹等的距离、方位和高度，就是利用电磁波遇到这些目标后能被反射，并且电磁波在空间传播具有一定的速度，以及雷达天线能够定向发射和接收等一系列自然特性的结果。

一、目标距离的测定

雷达的测距原理是以电磁波的反射和电磁波的传播速度恒定（等于光速）为依据的。711测雨雷达是一种脉冲制雷达，它向空间间歇地发射电磁波，称为发射波，如图1.2 a所示。当发射波遇到目标后，就被反射，形成反射波返回雷达，并被雷达所接收，这就是目标回波。

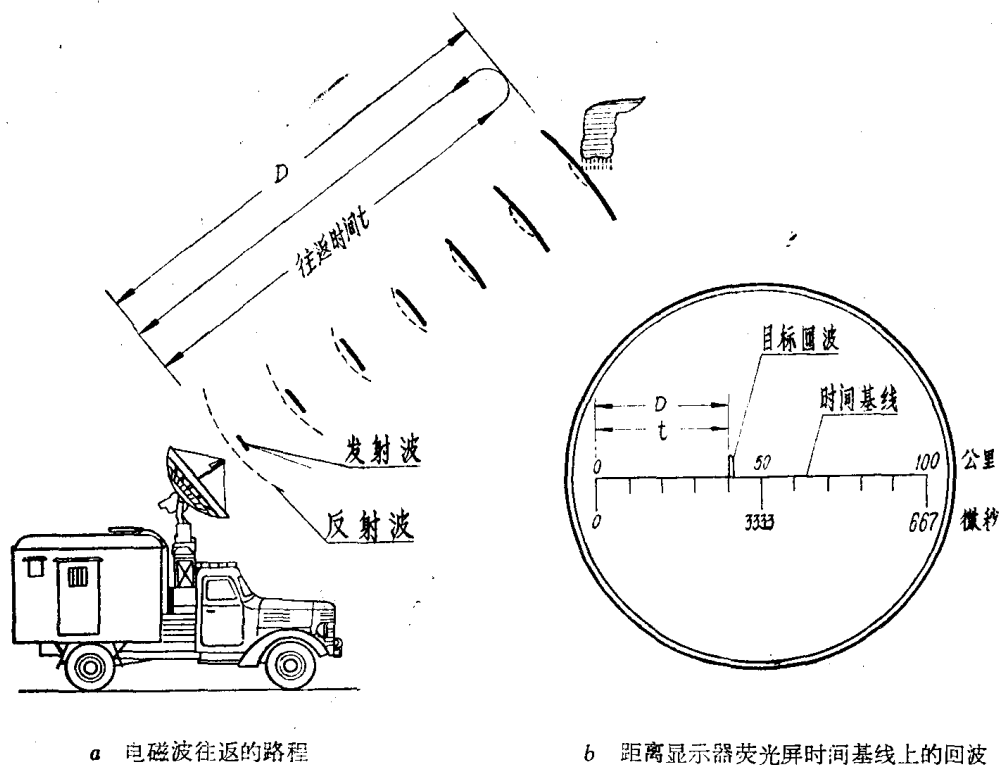


图1.2 测定目标距离的原理

由于电磁波在空间的传播速度等于光速 c ，因此，只要测出电磁波从出发到返回所经过的时间 t ，就能计算出电磁波往返的路程，这个路程的一半就是目标的距离 D 。写成数学公式就是：

$$D = \frac{1}{2} c \cdot t \quad (1.1)$$

式中 c ——光速，数值为 3×10^8 公里/秒。通常时间 t 以微秒（百万分之一秒，即 10^{-6} 秒）为单位；距离 D 以公里为单位。将光速 c 代入 (1.1) 式，就可以把雷达测距公式写成：

$$D = 0.15t \quad (1.2)$$

如果已知电磁波从雷达到目标之间的往返时间 t 等于 266.6 微秒，那么根据 (1.2) 式，就可以求出目标的距离 D 等于 40 公里。

实际上，电磁波的往返时间由雷达显示器荧光屏上的时间基线记录，并且把它换算成距离，用刻度标示出来，这种刻度称为距离刻度，如图 1.2b 所示。根据目标回波在时间基线上出现的位置，就可以直接按距离刻度读出目标的距离。

二、目标方位的测定

雷达测定目标方位的原理，是以天线能够定向发射和接收电磁波为依据的。从天线发射出去的电磁波并不是四面八方都有，而是象探照灯的灯光那样，集中在某一个方向上形成波束，如图 1.3a 所示。

当天线旋转时，波束也随着旋转，只有当波束转到目标所在的方位，对准目标时，才有电磁波反射回来，显示器荧光屏上才有目标回波显示出来。因此，当显示器荧光屏上出现回波，并且回波最亮（表示波束对准目标）时，天线所指的方位就是目标的方位。

711 测雨雷达中有一个平面显示器，这个显示器荧光屏上的时间基线与天线同步旋转，如图 1.3b 所示。这样，根据目标回波在显示器荧光屏上出现的位置，就可以直接读出目标的方位。

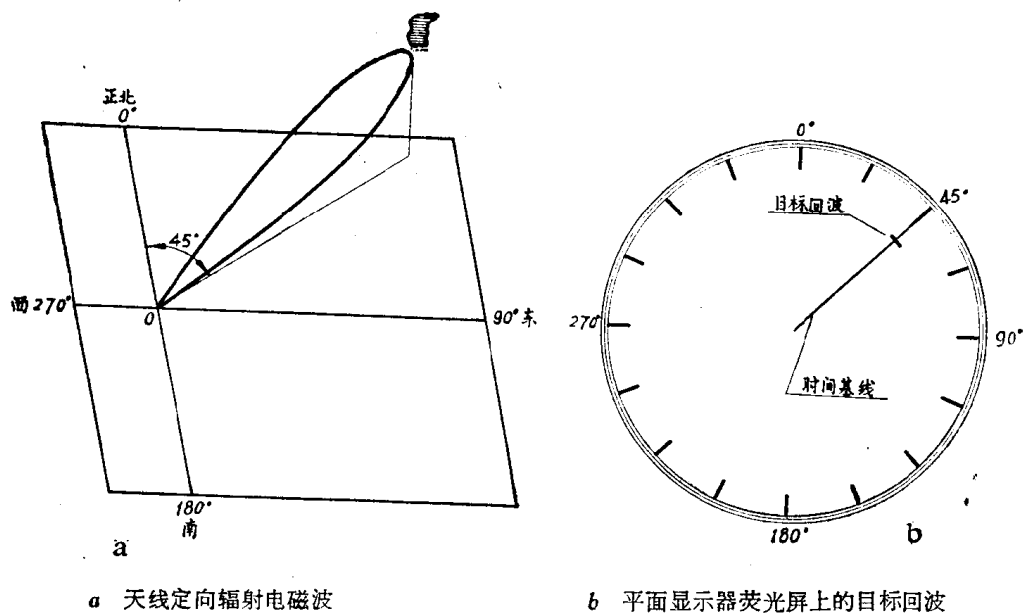


图 1.3 测定目标方位的原理

三、目标高度的测定

(一) 测高公式

711 测雨雷达的测高原理是以测定斜距 D 和测定仰角 β 为基础的。如图 1.4 所示，目标到地平线的高度 H 与斜距 D 和仰角 β 之间的关系，可由三角公式 $H = D \cdot \sin \beta$ 求出。

然而,由于地面的球形弯曲和大气折射的影响,计算目标高度时,就不能用公式 $H = D \cdot \sin \beta$ 来简单确定了,而必须加以修正。修正量 $\Delta H = \frac{D^2}{17000}$,以公里为单位,称为“地球曲率补偿高度 β ”,或简称“地曲补偿高度”。因此,目标离地球表面的实际高度应为:

$$H = D \cdot \sin \beta + \frac{D^2}{17000} \quad (1.3)$$

式中 H 以公里为单位。

1. 考虑球形地面对目标高度的修正

考虑地面球形弯曲影响的修正量,可用图1.5来说明。设天线 A 至目标的斜距为 D , 地平线 AC 与 AT 之间的夹角 β 就是目标的仰角。由于雷达天线的架设高度通常远远小于目标的高度,所以天线的架设高度可以忽略不计,图中天线画在地面上,目标离地球表面的高度 H 为:

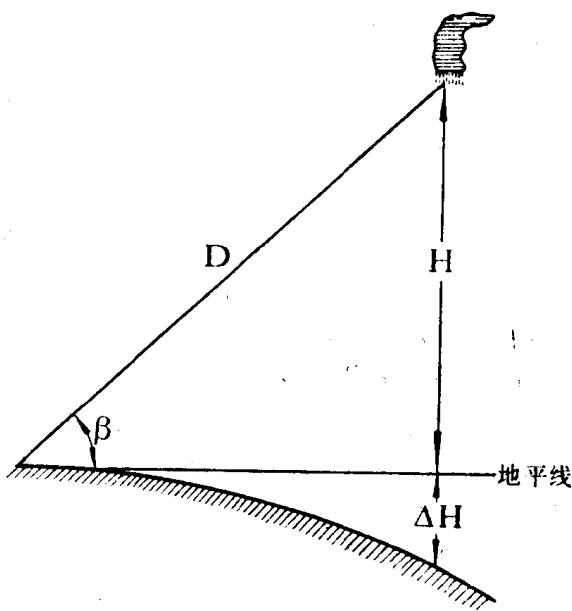


图1.4 高度和距离、仰角的关系

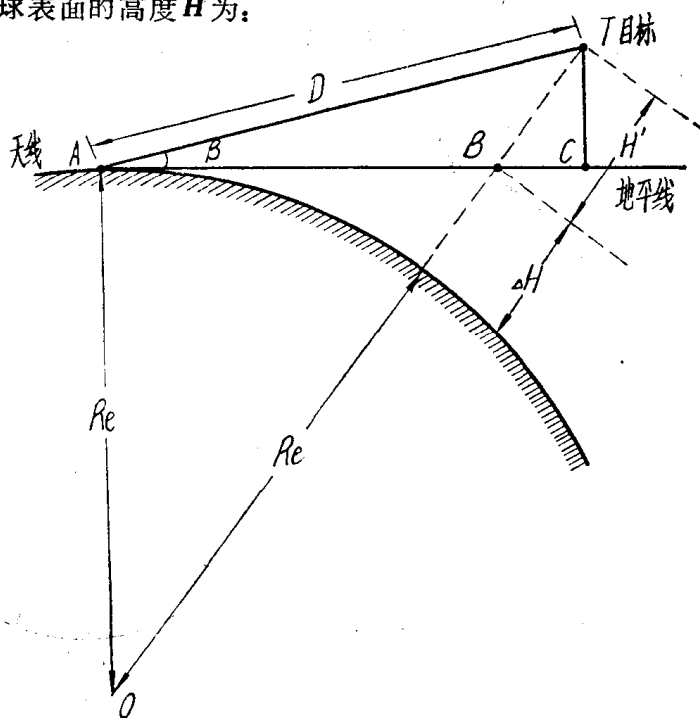


图1.5 考虑球形地面对目标高度的修正

$$H = H' + \Delta H$$

因为目标高度远远小于目标距离,即雷达天线对准目标的仰角很小,因此可近似认为:

$$AB \approx AT = D$$

$$CT \approx BT = H'$$

所以,

$$H' = D \cdot \sin \beta$$

由图可知,

$$(\Delta H + Re)^2 = Re^2 + AB^2 = Re^2 + D^2$$

左边展开,

$$\Delta H^2 + 2\Delta H Re + Re^2 = Re^2 + D^2$$

因 ΔH 很小, ΔH^2 为小量可略去, 所以

$$\Delta H = \frac{D^2}{2Re}$$

目标离开地球表面的高度为:

$$H = D \cdot \sin \beta + \frac{D^2}{2Re} \quad (1.4)$$

式中 $\frac{D^2}{2Re}$ 是考虑地面球形弯曲对计算高度的影响而求出的修正量。 $Re = 6370$ 公里, D 和 H 都以公里为单位。

2. 考虑大气折射对目标高度的修正 在一般情况下, 大气中的密度分布不均匀, 这就造成大气各层间的介电系数有差异。电磁波在空间传播时, 就要受这种介电系数的影响, 使其传播路径向下弯曲, 出现正折射现象。这不仅增大了低空目标的探测范围, 也会使探测目标的高度偏高。所以, 在计算目标高度时, 还要考虑大气折射的影响, 对测高公式需进一步加以修正。修正的方法是用等效地球半径 Re' 代替实际地球半径。这样就仍可按电磁波是直线传播来计算目标的高度, 其公式如下:

$$H = D \cdot \sin \beta + \frac{D^2}{2Re'}$$

式中 Re' 为等效地球半径, 单位为公里。

等效地球半径 Re' 与实际地球半径 Re 的比值, 称为地球半径修正比值, 或称大气折射修正系数, 用 K 值表示。将 K 值代入高度公式中, 得到:

$$H = D \cdot \sin \beta + \frac{D^2}{2KRe} \quad (1.5)$$

式中 $\frac{D^2}{2KRe}$ 为考虑地面球形弯曲和大气折射影响后, 求出的计算目标高度修正量。

K 值与各地区的气象条件有关。在标准大气折射情况下, 通常取 $K = \frac{4}{3}$, 所以等效地球半径 $Re' = KRe = 8500$ 公里, 这时, 目标的高度为:

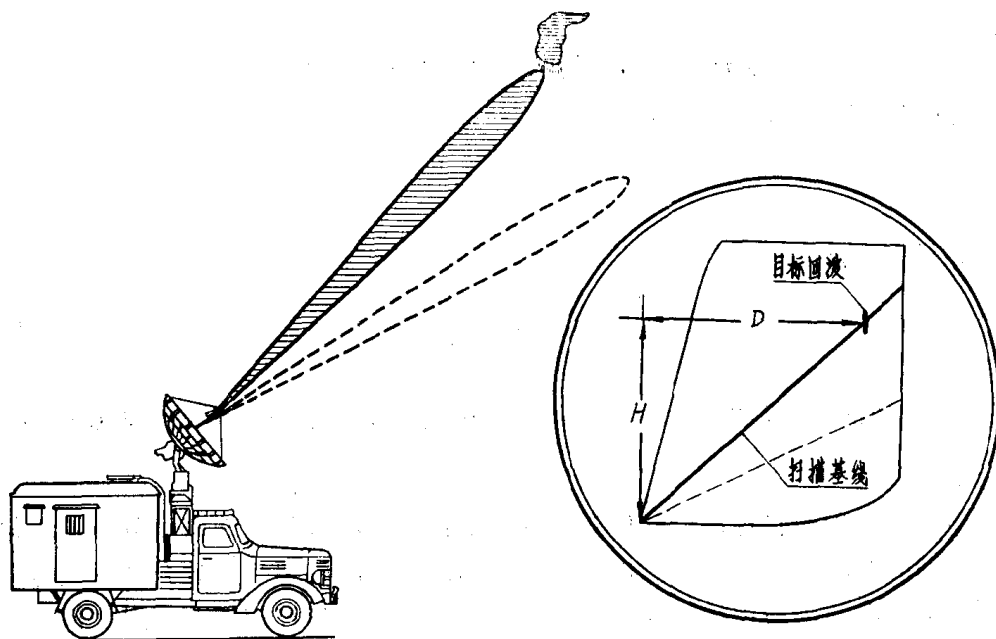
$$H = D \cdot \sin \beta + \frac{D^2}{17000}$$

K 值还与高度有关。一般情况下, 电磁波在高空传播时的弯曲程度比在低空时小, 即高空 K 值比低空小。因此用 $K = \frac{4}{3}$ 计算目标高度时, 往往会出现高空目标的高度读数偏低, 低

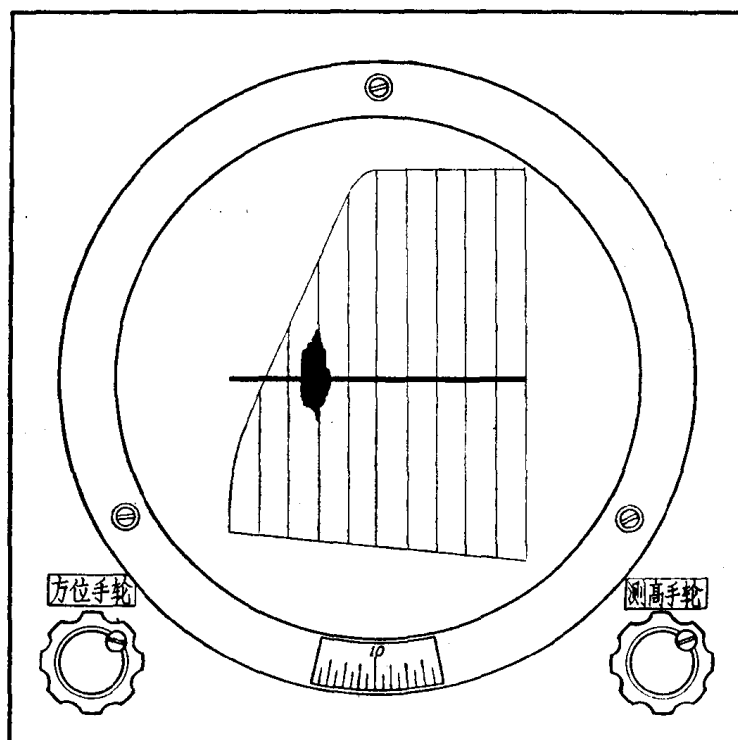
空目标的高度读数偏高的现象。

(二) 测高方法

711测雨雷达中有一个距离-高度显示器（简称高显）。测高时，波束随天线不断地俯仰，高度显示器荧光屏上的基线也随着波束的俯仰而同步摆动，如图1.6a所示。



a 高度显示器荧光屏上的基线随波束同步摆动



b 高度显示器荧光屏上的图象

图1.6 711测雨雷达的测高方法

§ 2 711测雨雷达的组成及概略工作过程

The diagram illustrates the functional architecture of a radar system. At the top, an antenna is connected to a waveguide system, which in turn connects to both a transmitter and a receiver. The receiver is also connected to an antenna controller. The transmitter's output is processed by distance, planar, and height displays. The receiver's output is processed by the planar and height displays. A frequency divider provides input to the distance and planar displays. A display power supply unit provides power to the distance, planar, and height displays. The antenna controller is also connected to the frequency divider.

图1.7 711测雨雷达简化方块图

它由发射机、天线波导系统、接收机、距离显示器、平面显示器、高度显示器、分频器、显示器电源部、天线控制器以及供电系统等部分组成。

发射机产生的大功率高频脉冲，经过波导系统送到天线，由天线定向发射到空间。此外，发射机还分五路输出触发脉冲：一路送到接收机，用来控制接收机中的自动频率控制器，使该电路与发射机同步工作；另一路送到分频器；还有三路分别送到距离显示器、平面显示器和高度显示器，使各个显示器和发射机同步工作。

从目标反射回来的高频回波脉冲，经过波导系统送到接收机。接收机将微弱的高频回波脉冲进行频率变换和幅度放大以后，输出视频脉冲到距离显示器，并经过距离显示器送到平面显示器。

分频器产生距离标志脉冲送到距离显示器和平面显示器。同时，它产生重复频率为 200 赫的触发脉冲送到高度显示器，使之产生高度扫描电压。平面显示器输出回波和距离标志的混合信号送到高度显示器（本雷达的平面显示器和高度显示器合用一只磁性示波管）。

天线控制器控制天线作方位旋转和俯仰往返。

本雷达各个分机没有统一的电源部。发射机、接收机和天线控制器都有各自的电源部，距离显示器、平面显示器、高度显示器和分频器的电源，由显示器电源部供给。

雷达的供电系统由三相调压器、中频电机组、交流起动机、电压调整器以及配电箱等部分组成。输入电源为三相 380 伏 50 赫交流电，可以用市电或油机发电供给。输入的三相电通过配电箱送到三相调压器，经过三相调压器后，起动中频电机组工作，中频电机组产生单相 115 伏 400 赫的交流电仍送回配电箱，通过配电箱将此单相 115 伏 400 赫交流电送到各个电源部。同时，三相调压器还将其中的一相 220 伏 50 赫交流电，通过配电箱送到天线控制器。

§ 3 711 测雨雷达的主要性能

711 测雨雷达的性能，是用一些数据来表明的。通常分为工作性能和技术性能两个方面，这两个方面的性能之间，有着密切的联系，我们要注意熟悉它们，以便在使用和维修中做到心中有“数”，充分发挥雷达效能。

一、主要工作性能

（一）探测范围

探测范围就是雷达能够测定目标的距离和高度的范围。探测范围是由很多因素决定的。属于雷达本身的因素有：脉冲功率、脉冲宽度、脉冲重复周期、天线的性能、接收机的性能等等；属于雷达以外的因素有：地形条件、云层的范围、密度等；此外，还与操纵、观测人员的经验有关系。因此，雷达的探测范围并不是固定的，情况和条件不同时，探测范围的大小也不同。

711 测雨雷达对于中等强度的积雨云层能够测距的范围不大于 300 公里，测高的上限为 20 公里。

（二）精确度

精确度是指雷达测定目标的距离、方位、高度所能达到的准确程度，通常用误差值表示。

711测雨雷达的测距误差为各档最大距离的 $\pm 2\%$ ；方位误差小于 ± 2 度；高度标志的误差小于 ± 200 米。

（三）分辨能力

分辨能力是指雷达能够分清两个互相靠近的目标的能力。

距离分辨能力通常是指相同方位、相同高度的相邻两个目标，在显示器荧光屏上能分清时，两个目标之间的空间距离。711测雨雷达的距离分辨能力小于500米。

方位分辨能力是指相同距离、相同高度的相邻两个目标，在显示器荧光屏上能分清时，两个目标之间相隔的方位角。711测雨雷达的方位分辨能力小于1.5度。

二、主要技术性能

（一）工作频率和工作波长

工作频率就是发射机在产生高频脉冲期间的振荡频率，用符号 f 表示。

工作频率的高低，直接影响到雷达的精确度、分辨能力和探测范围。从提高精确度和分辨能力出发，工作频率越高越好。但是，由于大气、云、雨、雪、雹等对电磁波能量的吸收，是随着工作频率的升高而增大的，因此，过高的工作频率就会减小雷达的探测范围。

711测雨雷达的工作频率为9340—9400兆赫。

工作波长是指电磁波在一个振荡周期内在空间所传播的距离，用符号 λ 表示。在数值上，波长等于光速 c 和工作频率 f 的比值，即

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

711测雨雷达的工作波长为3.19--3.21厘米。

（二）脉冲重复频率和脉冲重复周期

脉冲重复频率就是雷达发射的高频脉冲每秒钟重复出现的次数，用符号 F 表示。

脉冲重复频率的高低，影响到雷达探测范围的大小。脉冲重复频率越高，显示器荧光屏上显示的回波越清晰，远距离的目标越容易发现。但是，重复频率过高时，雷达的最大探测距离又会受到限制。

711测雨雷达的脉冲重复频率为400赫。

脉冲重复周期是指相邻两个高频脉冲之间的间隔时间，用符号 T 表示。脉冲重复周期和脉冲重复频率在数值上互为倒数，即

$$T = \frac{1}{F}$$

711测雨雷达的脉冲重复周期为2500微秒，见图1.8。

（三）脉冲宽度

脉冲宽度是指一个高频脉冲的持续时间，用符号 τ 表示。

脉冲宽度的宽窄，主要影响到雷达的最小探测距离和距离分辨能力。脉冲宽度越窄，最小探测距离越小，距离分辨能力越强。

711测雨雷达的脉冲宽度为1微秒，见图1.8。

（四）脉冲功率和平均功率

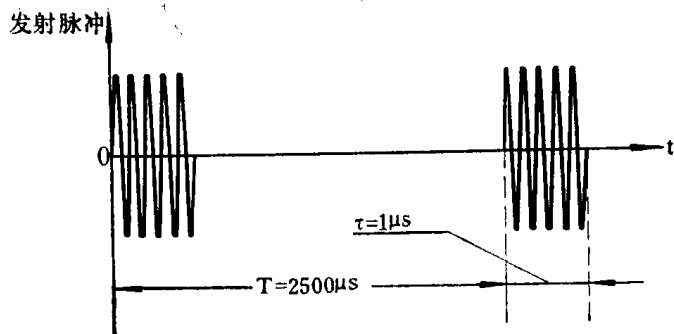


图1.8 脉冲重复周期和脉冲宽度

如图 1.9 所示，把短促而强大的脉冲功率，在整个周期内平均一下，即为平均功率。平均功率与脉冲功率有如下关系：

$$P_c \cdot T = P_m \cdot \tau$$

或

$$P_c = \frac{P_m \cdot \tau}{T}$$

711 测雨雷达的平均功率为 30 瓦。

(五) 波瓣宽度

前已提及，从雷达天线辐射出去的电磁波能量并不是四面八方都有的，而是如同探照灯的灯光那样，集中在某一个方向上形成波束。将波束画在一个平面上，它的形状就象花瓣一样，于是人们就叫它波瓣，这种图也就被称为波瓣图。

波瓣宽度，就是指波瓣的宽窄程度。它是用来衡量天线定向发射性能好坏的一个指标。它的定义是：波瓣图上两个半功率点方向之间的夹角 θ ，如图 1.10 所示。 θ 角越小，天线的定向性能越好。

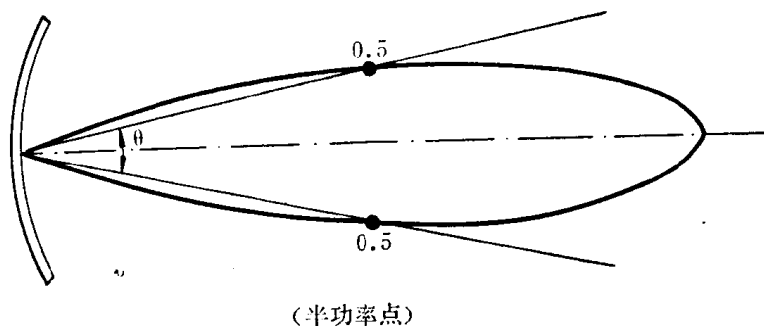


图1.10 波瓣宽度的定义

711 测雨雷达在垂直方向上的波瓣宽度（称为垂直波瓣宽度）为 1.45 度；在水平方向上的波瓣宽度（称为水平波瓣宽度）为 1.5 度。

脉冲功率就是在高频脉冲持续期间发射机输出的功率，也叫峰值功率，用符号 P_m 表示。

脉冲功率的大小，主要影响雷达的探测范围。在一定的条件下，脉冲功率越大，雷达的探测范围也越大。

711 测雨雷达的脉冲功率为 75 瓩。

平均功率是指脉冲功率在一个重复周期内的平均值，用符号 P_c 表示。

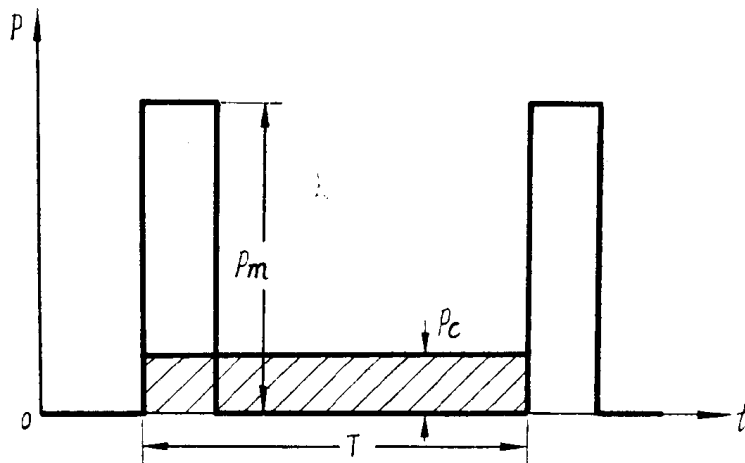


图1.9 平均功率与脉冲功率的关系图