

# 雷 达 原 理

东 风 主 编

内 部 资 料

北京科学教育出版社

1961.7

## 内 容 简 介

本書除闡明雷達的基本原理外，對雷達技術的應用也作了較多的敘述。

闡述了雷達探測目標的條件，測量目標的距離、方位角、仰角和高度以及對目標進行方向自動跟蹤和距離自動跟蹤的方法。

書中也陳述了選擇運動目標的雷達定位法，識別系統的應用，雷達制導，對雷達的干擾和反干擾的方法。

最後，簡單地介紹了雷達機基本參數選擇的原則。

本書著重介紹物理概念，通俗易懂。適合於高等學校雷達專業的學生閱讀，也可以作為廣大的無線電技術人員的參考書之用。



0744715

8630503



# 目 錄

TN 951/3

024

## 第一章 雷达概述

§ 1.1 雷达工作的基本原理..... 1

§ 1.2 雷达与其他科学技术的关系..... 3

§ 1.3 雷达的用途..... 024

## 第二章 目标距离的测定

§ 2.1 概 述..... 5

§ 2.2 脉冲测距法..... 5

§ 2.3 距离读数..... 7

§ 2.4 脉冲法的基本指标..... 9

§ 2.5 脉冲法测距产生误差的原因..... 11

§ 2.6 调频测距法..... 18

§ 2.7 利用调频法测量多个目标的距离..... 21

§ 2.8 相位测距法..... 23

§ 2.9 脉冲测距法、频率测距法和相位测距法的比较..... 26

## 第三章 测量雷达目标角座标的方法

§ 3.1 无线电定向原理..... 30

§ 3.2 振幅定向法..... 31

§ 3.3 振幅定向法之准确度..... 34

§ 3.4 形成等讯号方向的方法..... 36

§ 3.5 厘米波中方位的测定..... 41

§ 3.6 全景雷达站测定方位的准确度..... 43

§ 3.7 全景雷达站的方位鉴别力..... 49

§ 3.8 利用地面反射作用时，仰角和高度的测定..... 49

§ 3.9 使用扁平面波束测定仰角和高度..... 54

§ 3.10 目标高度的计算公式..... 56

## 第四章 同时测定目标的距离、方位和仰角

§ 4.1 概 述..... 58

§ 4.2 针状波束对空间的扫描..... 58

§ 4.3 扫描周期..... 60

§ 4.4 使用针状波束的雷达中角座标的测定误差..... 62

§ 4.5 使用V形波束的雷达系统..... 63

## 第五章 对目标方向和距离的自动跟踪

§ 5.1 引 言..... 66

§ 5.2 对目标方向的自动跟踪——圆锥形扫描法..... 66

§ 5.3 用单脉冲法进行精密跟踪..... 71

§ 5.4 对目标距离的自动跟踪..... 76

## 第六章 雷达站的作用距离

§ 6.1	概 述	79
§ 6.2	在自由空间雷达作用距离的基本方程式	79
§ 6.3	地球曲率和电波折射对雷达站作用距离的影响	84
§ 6.4	无线电波在大气中的衰减对雷达作用距离的影响	86
§ 6.5	无线电波由地面或水面反射的现象对雷达站的工作距离和定向特性的影响	88

## 第七章 雷达目标的反射特性

§ 7.1	目标的有效面积	95
§ 7.2	确定目标有效面积的方法	96
§ 7.3	全景雷达站方向性图的合理形状和作用距离	101

## 第八章 选择运动目标的雷达定位法

§ 8.1	概述	108
§ 8.2	利用都卜勒效应选择运动目标的方法	109
§ 8.3	固定目标回波信号的消除	112
§ 8.4	延时相减设备的特性和运动目标显示雷达站的可见度	115
§ 8.5	选择运动目标系统的工作质量的分析	116
§ 8.6	选择系统本身运动时对运动目标的选择	121

## 第九章 识别系统

§ 9.1	概 述	124
§ 9.2	二次无线电定位的基本方程	125
§ 9.3	回应器的基本线路	126

## 第十章 导弹的雷达导制

§ 10.1	引 言	128
§ 10.2	导弹制导的类型	128
§ 10.3	自动引导系统的目标座标器和作用距离	130
§ 10.4	自动引导系统的几种典型组成	133
§ 10.5	指挥制导系统的基本构成	136
§ 10.6	指挥系统中跟踪雷达及信标的组成及其主要参数	137
§ 10.7	驾束制导系统的基本组成	139

## 第十一章 对雷达干扰和反干扰的方法

§ 11.1	概 述	141
§ 11.2	消极的反雷达法	142
§ 11.3	积极干扰	143
§ 11.4	与干扰发射机作斗争的方法	146

## 第十二章 雷达机诸参数的选择

結束語

# 第一章 雷达概述

## § 1.1 雷达工作的基本原理

利用目标对电磁波的二次发射现象，发现目标和测定目标位置的无线电技术范畴，称为雷达。

### 一、发现目标

发现目标是基于，在电磁波激励下，目标产生二次发射。雷达是依靠测得目标二次发射所产生的回波，来发现目标的。工作原理如图1-1所示。

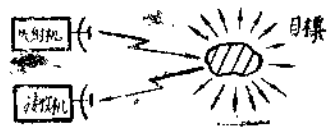


图 1-1

发现目标是进一步测定目标的首要步骤。由于目标距离雷达设备常是很远，回波是很微弱的，这时我们必须从不可忽略的各种干扰中检出回波信息。并且干扰中有的可能是敌人有意施放的，这样便增加了发现目标的困难。因此发现目标是近代雷达极其重要和艰难的工作。

### 二、测定目标的位置

#### 1. 目标位置的表示法

目标的位置常用如图1-2所示的球坐标或柱面坐标来表示。雷达设备置于坐标原点O。

球坐标表示法：

$r$ ——斜距；

$\alpha$ ——方位角；

$\beta$ ——仰角。

柱面坐标表示法：

$\alpha$ ——方位角；

$h$ ——高度；

$d$ ——水平距离。

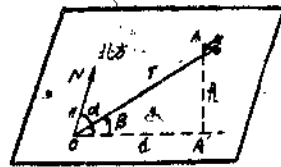


图 1-2

二种坐标转换公式

$$h = r \sin \beta$$

$$d = r \cos \beta$$

因此测定目标的位置，也就是测定目标的三个坐标。

#### 2. 目标距离坐标的测定

基于电磁波直线传播性质，和电磁波传播速度为一常数，则可由测量电磁波从发射，至接收到回波所需的时间间隔，来确定目标的距离坐标数据。如图1-3所示。

$$l_2 - l_1 = \frac{2r}{c}$$

$t_1$ ——发射电磁波的瞬间；

$t_2$ ——接收到电磁波的瞬间；

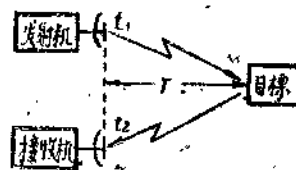


图 1-3

— 目标与雷达设备的距离；

$c$  — 电磁波传播速度。

所以雷达测量距离座标问题，实质上是测量时间的问题。

### 3. 目标角座标的测定

基于电磁波直线传播性质，因此只要测出回波的方向，则这个方向就是目标所在的方向。

雷达常是利用电磁波方向性发射和方向性接收的方法来确定目标的角座标数据。如图1—4所示。电磁波波束，在实线位置时，方能接收到回波信号，从而确定回波的方向，即目标的角座标。

所以，雷达测量目标角座标的问题，实质上是测量回波方向的问题。

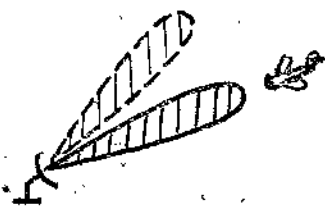


图 1-4

### 三、无线电定位

测定目标位置方法是很多的，如声学方法，光学方法。而雷达是利用无线电技术，其优点在于：

#### 1. 作用距离远：

利用声学，光学方法时，由于目标作为声源或光源时不能做得足够强大，所以，作用距离不可能很远，约为几公里到十几公里。而无线电定位时，由于能制造出功率足够强大的发射机和十分灵敏的接收机，如，远程警戒雷达作用距离可达几百公里。

#### 2. 测定目标座标的准确度高：

在声学方法和光学方法中，距离座标都是通过间接方法测量的，如图1—5所示， $l$  为已知，测得



图 1-5

$\alpha_1$  和  $\alpha_2$  后，再根据三角形关系求出目标的距离座标，由于对  $l$ ， $\alpha_1$ ， $\alpha_2$  的测量稍不准确，则通过计算所造成的误差就会很大。

用声学方法测定目标角座标时，由于空气密度和风速随着高度而变化使声波轨迹弯曲较大，因而测角误差也大。

应当指出，用光学方法测角比用一般雷达测角更为准确。

#### 3. 测量目标座标速度快：

由于声学、光学方法是用间接测量，所以，测量速度不高。对声学方法而言，由于声波传播速度的限制，以致用声学方法来测定超声速飞机的位置成为不可能。

4. 光学方法受到黑夜和气象条件如云、雨、雾、雪等的严重限制。用声学方法测定目标位置时，受到强的干扰声响（如炮的轰隆声、炸弹和地雷的爆炸声等）的限制。

但雷达比起声学、光学方法也有其缺点：

1. 设备复杂；生产期长；使用维护较难；重量体积较大；用电量较大。

2. 雷达易受到敌人施放的干扰。

3. 雷达所显示的目标信息，不及光学方法那样清晰。

### 四、雷达的辅助任务

从上述基本工作原理中看到，雷达设备的基本任务是发现和测定目标的位置。但在某些情况下，它还要完成如下一系列的辅助任务：

1. 如要测定这样一些点的位置，从这些点反射的回波，其能量并不比这些点周围的物

体的回波能量强多少倍。当我们测定地面、河岸或海岸上某些点的位置就是这种情况。这时，便要用雷达指向标。

2. 从固定目标的干扰背景中，选择出所需的运动目标。
3. 识别所发现的目标(飞机、舰艇)，是属于我方还是敌方的。这时便要使用敌我识别器。
4. 向远距离雷达站的指挥地点传送所得情报，这时便要使用雷达数据传输装置。
5. 干扰和反干扰。其目的在于使敌方雷达设备不能工作或工作困难。并使自己的雷达设备，即使在敌人的干扰下也能正常工作。
6. 作为导弹制导系统中接收导弹和目标信息的组成部分。

## § 1.2 雷达与其他科学技术的关系

早在1897年伟大的无线电发明家 A. G. 波波夫就发明了雷达原理，但雷达原理真正实际运用却是二十世纪三十年代的事。这是因为雷达技术的发展和运用，首先必需解决一系列的理论和科学技术问题。其中，决定性的环节就在于掌握超短波技术，脉冲和指示器技术。

### 一、超短波技术

雷达设备的工作波段是超短波(波长由10米——1厘米)。之所以用超短波是因为：

1. 只有当目标尺寸等于或大于发射波长时二次发射才会很强。
2. 在超短波波段内可以使用尺寸较小的天线而得到强方向性，从而增大了雷达作用距离，提高了测定目标角坐标的鉴别力和准确度。
3. 超短波波段的运用使我们能获得持续时间很短的高频脉冲，从而大大地提高了测定目标距离坐标的鉴别力和准确度。
4. 超短波不能由电离层反射，因此消除了如图1-6所示当工作在较长波长时从电离层反射回来的假信号。



图 1-6

因此，雷达工作波段有这样的发展趋势：由米波到公分波、厘米波及近年来发展到毫米波波段。

要把超短波技术运用到雷达中来就必须首先解决超短波的产生，传输，发射，传播，接收等一系列问题。

### 二、脉冲和指示器技术

早期的连续波工作雷达是无法测定多个目标的距离的。但脉冲技术在雷达中的运用，成功地解决了以高鉴别力测定多目标的问题。

大家已经知道雷达测距实质上即是测时的问题，而所要测的这段时间是极短的。当目标与雷达的距离为几百公里时，要测的时间也不过几千微秒！测定这样短的时间并将其显示，这个任务是由指示器来完成。同样，要把这技术在雷达中运用，就必须首先解决脉冲的产生，放大，调制，解调等一系列问题，并制造出特殊的器件——阴极射线管。

### 三、其他科学技术

由于近年来雷达目标的运动速度和机动性大为提高，活动或攻击的区域更为广大，实际作战中目标的数目大大加多。因此，对雷达便提出更高的要求，要求探测距离远，作用速度快，测量数据准，能对付多目标。所以，雷达越来越密切地和自动控制技术，数据传输，变换装置，计算机技术等联系起来。

### § 1.3 雷達的用途

雷達最先是用于軍事方面。在第二次世界大戰中，由于軍事上的迫切需要而發展得十分迅速，直到現在，雷達已經發展到相當完善的地步。

雷達——這種近代電子學兵器差不多裝備到各個兵種中。

陸地上用的有：警戒雷達、引導雷達、探照燈雷達、炮瞄雷達、導彈制導雷達、反迫擊炮雷達、前沿陣地搜索雷達，海岸雷達等。

船舶上用的有：搜索雷達、引導雷達、炮瞄雷達、操縱魚雷射雷達等。

飛機上用的有：高度表、雷達測距機、搜索雷達、轟炸瞄准雷達、截擊雷達等。

第二次世界大戰後的年代里，雷達在和平事業上也得到廣泛的運用。

在導航方面：指揮、監督飛機在空中飛行。引導飛機盲目着陸。指揮、監督船隻航行。引導船隻進港和指揮其在港內活動。

在氣象方面：用來探測雲層，風暴的位置並測定其移動路線。用來對測候氣球進行跟蹤以獲得高空的氣象情報。

在天文方面：用來對宇宙空間各星體的輻射進行研究，以便了解有關星體的特性。對星體進行定位和跟蹤，從而研究星體的位置和運動規律。

在人造衛星和宇宙航行方面：用來跟蹤人造衛星，及測定它的運動規律，雷達也占有極其重要的地位。

其他在國民經濟和科學的許多部門如大地測量，探礦等等方面，雷達設備的應用也具有很大的實際意義。



## 第二章 目标距離的測定

### § 2.1 概 述

測定到目标的距離是雷達的基本任務之一。有時這甚至是唯一的任務，例如，對於各種無線電測距儀和高度計等便是如此。

雷達中進行測距的方法有以下三種：

1. 脈沖法；
2. 調頻法；
3. 相位法。

以上三種方法都是以無線電波在空間的傳播速度是一固定數值為基礎的。

### § 2.2 脈沖測距法

脈沖法是雷達測量距離的基本方法。脈沖測距機的典型方塊圖如圖2—1所示。圖2—2上的電壓波形，則說明此類雷達的工作情形。脈沖法的實質如下：雷達發射機周期性地，每隔一段較長的時間（間歇）發射一次短促的無線電脈沖（高頻脈沖串），而雷達接收機則在發射脈沖的間歇時間內接收目标的回波。測出發射脈沖到開始接收目标回波之間的時間 $t_r$ ，就可以確定到目标的距離。由於電磁波兩次通過雷達和目标間的距離 $r$ ，故時間 $t_r$ ，等於：

$$t_r = \frac{2r}{c}$$

式中 $c$ ——無線電波的傳播速度。

移項，得：

$$r = \frac{c \cdot t_r}{2} \quad (2.1)$$

時間的測定應當很精確。例如，若要求距離 $r$ 的測定精確度為±15米（在炮瞄雷達中就是這樣），那麼，時間測量精確度應為：

$$\Delta t_r = \frac{2\Delta r}{c} = \frac{2 \times 15}{3 \times 10^8} = 10^{-7} \text{秒} = 0.1 \text{微秒}。$$

利用具有電子射線管的指示器，可以獲得上述的時間測定的精確度。在指示器與發射機之間應當建立嚴格的聯繫，因為目標距離的測定是根據目标回波滯後於發射脈沖的時間來進行的。這種嚴格的聯繫在某些設備（例如，圖2—1所示的測距機）內，是由一種觸發脈沖發生器來保證的。觸發脈沖發生器規定發射脈沖的重复頻率，並使發射機與指示器的工作同步；在另一些設備內同步即由調制器的脈沖來實現，這種脈沖同時觸發高頻發生器和指示器線路，因之便無必要再設專門的觸發脈沖發生器了。

指示器是脉冲雷达的最重要的部分，因为测定回波滞后于发射脉冲的时间数值正是利用它来进行的。指示器的主要组成部分是：方波发生器，扫描电压发生器和电子射线管。

方波发生器由触发脉冲（参看图2-1和2-2）触发后，同时产生正负极性的脉冲，脉冲的宽度等于接收最大作用距离上的目标回波所需的时间。普通的触发多谐振荡器即可用作方波发生器。

正极性的方波脉冲加至射线管的控制极，使射线管在扫描正行程的时间内进行工作。负极性的方波脉冲控制扫描发生器输出锯齿波电压。此电压加到电子射线管偏转板上，使亮点在指示器荧光屏上移动，亮点移动的速度决定于加到偏转板上的电压的增长速度。如果扫描

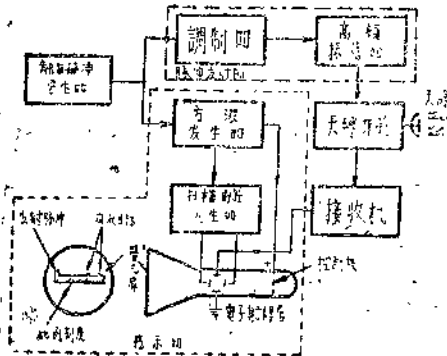


图2-1 脉冲雷达方塊圖

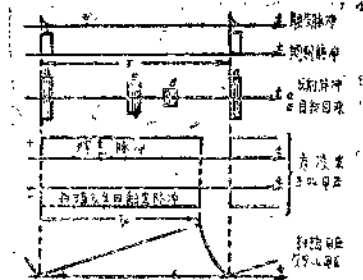


图2-2 说明脉冲雷达工作的电压波形

发生器的电压在时间上按线性规律变化，那么亮点将以固定的速度  $V_n$  在荧光屏上从左向右移动，因此亮点在荧光屏上位移的数值可以用来表示扫描的时间，扫描的起点与发射搜寻脉冲的起始瞬间相吻合。

视频信号从接收机的输出端加到射线管的垂直偏转板，使亮点在荧光屏上偏移，形成短促的尖头脉冲（图2-3）。第一个尖头脉冲是由经天线开关渗入接收机的发射脉冲产生的，其余的尖头脉冲则由目标回波所形成。上述过程周期性地重复着，重复频率  $F_n$  的数值须相当大，使能保证基于视觉暂留现象使在荧光屏上的图象看起来是连续的，而便于观测 ( $F_n = \frac{1}{T_n}$ ，

式中  $T_n$ ——发射脉冲的重复周期)。

上述的时间扫描就是静电偏转式（电偏式）电子射线管的指示器而言的。在电磁偏转式（磁偏式）电子射线管的指示器中情形也大致相仿。此种指示器的偏转系统由两对装在射线管外部的线圈：垂直偏转线圈和水平偏转线圈所组成。其中一对线圈（例如，水平偏转线圈），当接有锯齿波电流时，就使亮点在荧光屏上偏移（自左至右）；而另一对线圈则当接有雷达视频信号产生的脉冲电流时，便在垂直于时间扫描线的方向上产生短促的尖头脉冲。不过，电磁偏转式电子射线管通常都使用在比较复杂的、须同时测定距离和方位，距离和高低角或方位和仰角等的指示器内。而在只用于测距的指示器中通常都使用静电偏转式电子射线管。

因为亮点在荧光屏上的偏移数值可用以测量扫描的时间，所以发射脉冲的前沿与回波前沿间的距离  $l$  即表示到目标的距离。实际上：

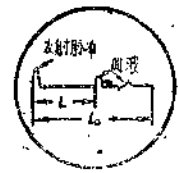


图2-3 电子射线管荧光屏

$$l = V_n t_r = V_n \frac{2r}{c}$$

式中  $V_n$ ——亮点在荧光屏上的运动速度（扫描速度）；

$\frac{2r}{c}$ ——电磁波往返于雷达与目标的时间。

显然, 
$$V_n = \frac{l_p}{t_p}$$

式中  $l_p$ ——扫描线全长；

$t_p$ ——扫描正行程的时间。

通常  $t_p < T_p$ , 式中  $T_p$ ——扫描正行程之最长时间（参看图 2-2），因此计算  $l$  的公式又可表示如下：

$$l = \frac{2l_p}{ct_p} r = \frac{l_p}{r_p} r = m r \quad (2.2)$$

式中  $r_p$ ——与扫描线全长相应的距离；

$m = \frac{l_p}{r_p}$ ——扫描线上距离的刻度单位。

从上式中可以看出，扫描线可用长度单位直接分度。

在大多数脉冲雷达中，为了减小雷达的重量和体积，发射和接收通常都只使用一部天线。但是，如果使天线直接与发射机及接收机相接通，那么在发射时接收机可能遭到损坏，或严重地为发射脉冲过载（特别是在大功率雷达中）；而在接收时，原已很弱的回波能量势必有一部分为发射机输出电路所吸收。为了消除这种现象，雷达采用了天线转换开关，当天线发射时，转换开关将天线与发射机接通，并使之与接收机断路；而在雷达接收时，则又将天线转接到接收机上，而与发射机断开。

### § 2.3 距离读数

通常目标距离或直接从刻在荧光屏上的机械刻度上读出，或根据时间扫描线上的电刻度来读出。

根据信号对电子束调制的方式，可分为偏转调制和辉亮调制。偏转调制是信号加在偏转板上，使扫描线在垂直于扫描线的方向上引起位置的偏移。辉亮调制是信号加在控制栅极上，增加扫描线的亮度。因为偏转调制和辉亮调制在距离读数方面有着相似性，故下面我们只对偏转调制的距离读数方法进行阐述。

#### 一、机械刻度读数法

电子射线管荧光屏上装有机械刻度尺（图 2-4）。

移动扫描线，使发射脉冲前沿对准刻度起点，这样，根据回波前沿就能读出距离的数值。

利用发射脉冲和回波脉冲的后沿或两者的峰点

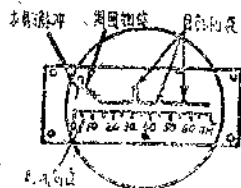


图 2-4 机械刻度的距离读数

(当脉冲为三角形时) 来求距离讀数是不适当的, 有时甚至不可能。因为脉冲通过接收机时会发生失真, 其峰点可能被展平; 此外, 回波的宽度还会受到目标尺寸的影响。

机械刻度讀数法的最大优点是方法简单。缺点是讀数精确度低。最主要的誤差有: 1) 当回波脉冲的前沿介于两刻度分划之間, 目标距离有賴目力測定时要产生插入誤差; 这种誤差在运用不均匀的扫描时更为增大; 2) 当供电方式或扫描綫路元件的参数偶然改变时要产生誤差; 这是由于扫描速度和扫描綫長度都要改变, 以致扫描范围和刻度比例尺不能相符; 3) 視差誤差。

此外, 由于荧光屏上装有刻度比例尺, 也在一定程度上恶化了观测条件。

机械刻度讀数法用于远程警戒雷达和其他測量精确度不需很高的装置中。

## 二、电刻度的讀数法

在指示器荧光屏上可使用电的距离标志刻度来代替机械刻度(图2—5)。为此, 在指示装置中要有一稳定的刻度波发生器。发生器输出的正弦波变换成前沿很陡的尖头距离刻度(图2—6)。两相邻刻度間的距离准确地决定于刻度发生器的振荡周期。例如, 10 公里刻度的发生器的振荡周期为:

$$T_{FM} = \frac{2\Delta r'}{c} = \frac{2 \times 10}{3 \times 10^8} = \frac{2}{3} \times 10^{-7} \text{ 秒}$$

或

$$F_{FM} = \frac{1}{T} = 15 \text{ 千周}$$

在电子射线管荧光屏上产生电的距离刻度的方法很多。最方便的是利用双射束的电子射线管。在这种射线管中, 一根电子束是为雷达信号的扫描, 而另一根则用来产生电刻度(图2—5)。类似的情形在单射束的电子射线管中也能得到, 只須在偏轉板上轮流地接以雷达視頻信号和距离刻度电压。例如, 可将距离刻度电压每隔一次扫描接到水平偏轉板上, 并且同时使这两个扫描在垂直方向上作少許的分开。

电的刻度不仅可以有幅度标志的形式, 且也可以采用輝亮标志的形式。方法是适当地調整电子束的輝度。輝度标志通常用在除了測量距离外还須測量角坐标的指示器中。例如用



图2—5 电刻度的距离讀数

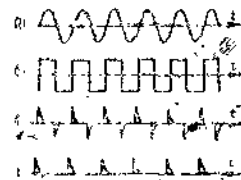


图2—6 距离刻度的形成

- a—刻度波发生器的电压;
- b—放大和限幅后的电压波形;
- r—矩形波微分后的脉冲波形;
- r—削去脉冲半周后的距离刻度。

在距离——方位, 距离——高低角等指示器中。

采用电刻度要比机械刻度优越得多。首先供电方式或扫描綫路中元件参数的改变不致使距离讀数产生誤差, 因为随着扫描長度的改变, 荧光屏上距离刻度之間的距离也同时成比例地改变。其次, 不存在視差誤差, 因为刻度与扫描在同一平面上。最后, 由于荧光屏上没有

机械刻度，因而改善了回波的观测条件。

电刻度的缺点也和机械刻度一样，是存在插入误差。此外由于运用了辅助线路——稳定的刻度波发生器，从而使机器的组成部分略为复杂化了。

应当指出，在许多实际应用中，指示器内既装有机械刻度，又有刻度波发生器，这时，发生器的输出电压或是为了使距离测量得更精确而用以产生电刻度和校准机械刻度，或仅是用来校正机械刻度。为了减小插入误差，可以应用移动的（或固定的）测量标志对准回波前沿来读数的方法。

## § 2.4 脉冲法的基本指标

下面来研究一下脉冲测距法的几种基本指标：

- (一) 最大可测距离；
- (二) 距离鉴别力；
- (三) 最小可测距离。

### 一、最大可测距离

最大可测距离  $r_{\text{max}}$  取决于发射脉冲的重复周期  $T_n$ 。如果周期  $T_n$  太小，即如果发射脉冲重复频率太大的话，那么就会产生如下的现象：在雷达还未能接到远距离目标的回波时，次一发射脉冲便已发射出去，在指示器中则开始了新的扫描，因之上述目标回波便在刻度的起始处出现，而使观测员无所适从。为了消除这一现象，必须根据雷达所能测量的最大距离来选择脉冲的重复周期  $T_n$ 。由图2—2中可以看出，最大可测距离为：

$$r_{\text{max}} = \frac{c}{2} T_p$$

式中  $T_p$ ——扫描正行程的最大持续时间。

考虑到指示器的扫描负行程约占周期  $T_n$  的 20%，得到：

$$r_{\text{max}} = \frac{c \times 0.8 T_n}{2} = \frac{0.4c}{F_n} \quad (2.3)$$

式中  $F_n$ ——发射脉冲的重复频率。

很明显，在设计雷达时必须遵守如下的条件：

$$F_n \leq \frac{0.4c}{r_{\text{max}}} \quad (2.4)$$

### 二、距离鉴别力

距离鉴别力定义为位置在同一方向上犹能分别出的诸“点目标”的最小距离。

首先我们来研究不计及雷达参数的影响，且脉冲具有严格的矩形时的距离鉴别力。假定在发射脉冲传播的方向上有两个“点目标”存在：距雷达较近的目标 A，和较远的目标 B（图2—7）。现在我们来求此两目标能被分别发现时应有的最小距离  $r_{\text{min}}$ 。设在某一瞬间发射脉冲的前沿到达目标 A。目标 A 受照射后，便开始于时间  $\tau$  内反射电磁能（ $\tau$ ——发射脉冲的宽度）。电波由 A 反射后，经数值为  $\frac{x}{c}$  的时间后，目标 B 亦开始反射。十分明显，只有当目标 A 所进行的反射在目标 B 反射的回波到达 A 之前结束，在荧光屏上才能分辨出两个

目标。

目标B的回波与目标A的回波相较，滞后时间为：

$$\Delta t = \frac{2x}{c}$$

因此，为了分别接收两目标的回波，应当实现如下条件：

$$\frac{2x}{c} \geq \tau_u$$

由此得出计算鉴别力的公式为：

$$\Delta r_{\min} = x_{\min} = \frac{c \cdot \tau_u}{2}, \quad (2.5)$$

即距离鉴别力决定于发射脉冲的宽度。例如当  $\tau_u = 1$  微秒时， $\Delta r_{\min} = 150$  米。

通常在计算距离鉴别力时，都应当估计到接收机和指示器电路的影响。

为了能在荧光屏上分别出两目标的回波，要求较近的目标回波对接收机的作用必须在远目标回波开始作用于接收机之前前结束，并且接收机输出端的近目标回波电压应当迅速下降，使远目标回波电压的增长得以在荧光屏上显示出来；同时亮点在荧光屏上对近目标波形边缘所作的位移应相当于自己的直径。

近目标回波作用于接收机的时间为  $\tau_u$ 。回波后沿的宽度与接收机通带成反比：

$$\Delta \tau = \frac{a}{\Delta F}, \quad (2.6)$$

式中  $a$ ——比例系数；

$\Delta F$ ——接收机通带。

亮点位移一段距离  $d$  ( $d$ ——亮点直径) 所需的时间为：

$$\frac{d}{V_n} = \frac{d}{l_p} t_p$$

因此，两目标回波开始接收的瞬间应相隔一段时间  $\Delta t$ ，其数值为：

$$\Delta t = \tau_u + \frac{a}{\Delta F} + \frac{d}{l_p} t_p$$

此时间内电磁波所经过的路程(往返)即为雷达的距离鉴别力：

$$\Delta r_c = \left( \tau_u + \frac{a}{\Delta F} \right) \frac{c}{2} + \frac{d}{l_p} t_p \frac{c}{2} = \left( \tau_u + \frac{a}{\Delta F} \right) \frac{c}{2} + \frac{d}{l_p} r_p \quad (2.7)$$

从公式(2.7)中可以看出，要增大雷达距离鉴别力必须：1)减小发射脉冲的宽度；2)增大接收机通带；3)增加扫描长度(当  $r_p = \text{常数}$  时)并采用比值  $\frac{D}{d}$  尽可能小的电子射线管( $D$ ——射线管荧光屏的直径)。

通常， $\frac{d}{D} = \frac{1}{150 \sim 200}$  静电偏转式射线管，和  $\frac{d}{D} = \frac{1}{200 \sim 400}$  磁偏转式射线管。

雷达的鉴别力  $\Delta r_c$  可以大大超过  $\Delta r_{\min}$ 。但是，应当说明的是往往即使两目标之间的距离小于  $\Delta r_{\min}$ ，仍然可能分别辨清它们的回波。

例如，假定有两目标彼此相距非常之近，二者的回波在荧光屏上形成了一个宽的脉冲，并且每一波在荧光屏上的长度都远远超过了亮点的直径。那么，即使在这样的情形下，仍可以根据荧光屏上脉冲相互交迭处两回波的相位关系来使总的回波放大或衰减，以便根据荧光屏上得到的波形来判断两目标的存在，甚至可以根据脉冲的峰点近似地求出两目标间的距离（图2—8）。

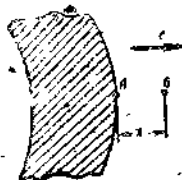


图2-7 距离鉴别力计算附图



图2-8 距离鉴别力为  $\Delta r_c < \frac{C\tau_u}{2}$  时的两目标的叠加波形

如果出现的是两个活动的目标，那么在脉冲交迭处由于两相加信号相位差的经常改变，便会产生奇特的信号波动。根据这种波动同样也可以判定有两目标存在，和近似地求出它们之间的距离，此时雷达鉴别力的数值为：

$$\Delta r'_{min} \approx (0.6 \sim 0.7) \Delta r_{min} \quad (2.8)$$

### 三、最小可测距离

在没有天线转换开关，并且由发射脉冲所引起的接收和过载现象可忽略不计的小功率雷达中，最小可测距离等于距离鉴别力。

在中等功率和大功率的雷达中，最小可测距离基本上取决于发射脉冲的宽度  $\tau_u$ ，和接收机受发射脉冲影响后灵敏度的恢复时间  $t_a$ ：

$$r_{min} = (\tau_u + t_a) \frac{c}{2} \quad (2.9)$$

通常，大部分的恢复时间（1~2微秒）都消耗在用于保护接收机的天线转换开关火花隙的起始状态之恢复上。

## § 2.5 脉冲法测距产生误差的原因

脉冲雷达测距机实质上是一种精确度很高的测量仪器。如上所述，要使测距精确度达  $\pm 15$  米，那么雷达必须保证测量回波滞后于发射波的时间时，测量精确度达 0.000001 秒。因此，实际上对雷达所提出的要求，也和对测量仪器一样，应该是极严格的。

自然，对测距精确度的要求，应视雷达的任务而定。例如对远程警戒雷达只要求相对精确度在刻度值的  $\pm 1 \sim 2\%$  的范围内即可。亦即当距离为 200 公里时，可以允许有 2~4 公里的误差。但对于炮瞄雷达则要求测距误差应当很低。通常炮兵雷达的最大测距误差在 40 公里以下的作用距离上都不应超过 20~25 米。

主要的测距误差有：

- 一、因无线电波传播速度的不稳定而导致的误差；
- 二、因雷达电路内信号的延时，以及指示器与雷达发射机同步的不精确而导致的误差；

### 三、因扫描电压波形失真而導致的誤差：

### 四、因电子射綫管和扫描綫路的参数改变以及电源的不穩定而導致的誤差：

### 五、讀数誤差。

第一、二、三条所述之誤差是属于經常性誤差，在必要的情況下，它們是可以計算出（利用校准图或表）或在測量之前对雷达进行校准而排除掉。

讀数誤差基本属于偶然性誤差，可以利用計算概率的方法計算出来。

第四条所述之誤差，取决于雷达站的工作条件，能够轉变为偶然性的或經常性的。

为了在每种具体情況下，能够正确地估計某种誤差对測量精确度的影响以及拟出計算或消除的方法，必須对各种誤差来源有清楚的了解。

下面我們就依次来研討产生上列誤差的原因。

#### 一、因無線电波傳播速度的不穩定而導致的誤差

測量距离的原始方程为：

$$r = \frac{ct}{2}$$

由此方程中可以看出，測距的精确度不但决定于時間  $t$  的測量精确度，而且也取决于速度  $c$  的实际数值。

在近似的計算中，一般都將無線电波的傳播速度看为一常数： $c = 3 \times 10^8$  米/秒，但实际上在物理性質不同的介質中，电波速度  $c$  就不相同，这便是产生測距誤差的原因之一。

表 2.1 中所举的一些数字系电波在不同条件下傳播时的速度。

显然，由于电波傳播速度的不穩定，就限制了雷达測距精确度的提高。

表 2.1 不同条件下的电波傳播速度

傳播条件	$c$ 公里/秒	备注
真空	299776 ± 4 299773 ± 10	根据1941年測得的材料 根据1944年測得的材料
中波： 1) 咸水、淡水上空 2) 陆地上空	299000 ~ 299500 295000	$c$ 的最大值 $c$ 的平均值
米波在海上傳播	299687 ± 5	脉冲导航系統測得的材料
厘米波 ( $\lambda = 10$ 厘米) 在地面—飞机間傳播， 当飞机高度为： $H_1 = 3.3$ 公里 $H_2 = 6.5$ 公里 $H_3 = 9.8$ 公里	299713 299733 299750	皆为 $c$ 的平均值，根据脉冲导航系統測得的材料



## 二、因雷达线路信号的延迟和指示器与发射机同步的不精确而导致的误差

设公式 2.1 中的速度  $c$  为已知, 那么测量出发射脉冲与回波脉冲之间的时间数值  $t$ , 就可以求出到目标的距离。这一段时间由扫描线以一定的比例表示在电子射线管的荧光屏上, 并且利用公式 2.2 也不难求出

$$l = m r = m \cdot \frac{c}{2} t, \quad (2.10)$$

式中,  $\frac{mc}{2}$  —— 时间刻度单位。

因此到目标的距离可以根据电子射线管荧光屏上发射脉冲前沿和回波前沿之间的距离求出。不过, 两脉冲前沿之间的距离只有在下列的条件下才能准确地表示到目标的实际距离: 即发射脉冲与目标回波加到射线管偏转板时的时间差完全等于天线开关发射脉冲到开始接收回波之间的时间差。而实现这一条件的前提是: 两脉冲从高频振荡器到射线管偏转板间所经过的行程差应恰等于距离  $2l$ 。但实际上两者的行程差却还要大些, 因为发射脉冲是从天线转换开关不经过天线的输送线而直接加于接收机的输入端的, 而目标回波则二次 (发射前和接收后) 经过这段线路。由于脉冲在上述输送线中的延时, 读出的距离数要比实际数值大, 亦即出现了测量的原始误差。

有些雷达中, 距离读数不是从发射脉冲的前沿, 而是从扫描的起点开始。这时除了上述原始误差以外, 还有因指示器和发射机同步的不精确而产生的误差。同步不精确的原因, 是触发脉冲到达高频振荡器和到达扫描线路所经的路程不同。

如果脉冲在雷达线路中的延迟随着时间而改变, 那么原始误差也相应地改变。

在原始误差相当大的装置中, 必须采取专门的方法来加以消除, 或予以测定, 以便作必要的校正。

## 三、因扫描电压波形失真而导致的误差

大多数场合下, 指示器都备有均匀的读数刻度尺。这时整个刻度尺上的比例都相等。这样读取任何距离数值都很方便。

为了获得均匀的扫描, 控制荧光屏上亮点运动的电压, 在时间上应严格地按线性规律变化。但在实际装置中要使扫描电压严格地按线性规律变化, 是有困难的。通常扫描线路所产生的电压只接近于线性, 因此扫描电压的变化速度在实际装置中是不够稳定的, 这便导致扫描线不同部分的比例也不尽相同。而这也成为测距时出现误差的另一原因。例如, 图 2-9 所示: 为产生均匀扫描而必需的电压是直线  $AB$ , 而实际线路所产生的电压是曲线  $ACB$ 。因为曲线  $ACB$  高于直线  $AB$ , 所以与直线  $AB$  相比, 除了起点和终点而外, 亮点离开扫描起点的距离要大于精确读数所需的距离。因此, 读出的距离数要超过实际数值。

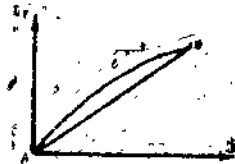


图 2-9 扫描电压正行程需要的波形和实际波形的示意图

减小上述各种误差的根本方法是采用专门的稳定度很高的线性扫描线路。

## 四、因扫描线路和电子射线管的参数以及电源的不稳定而导致的误差

指示器线路元件参数的变动, 以及电源的不稳定会导致扫描电压幅度的变化。同时亮点运动的速度, 以及扫描线的度量比例也跟着改变, 因而就引起测距误差。