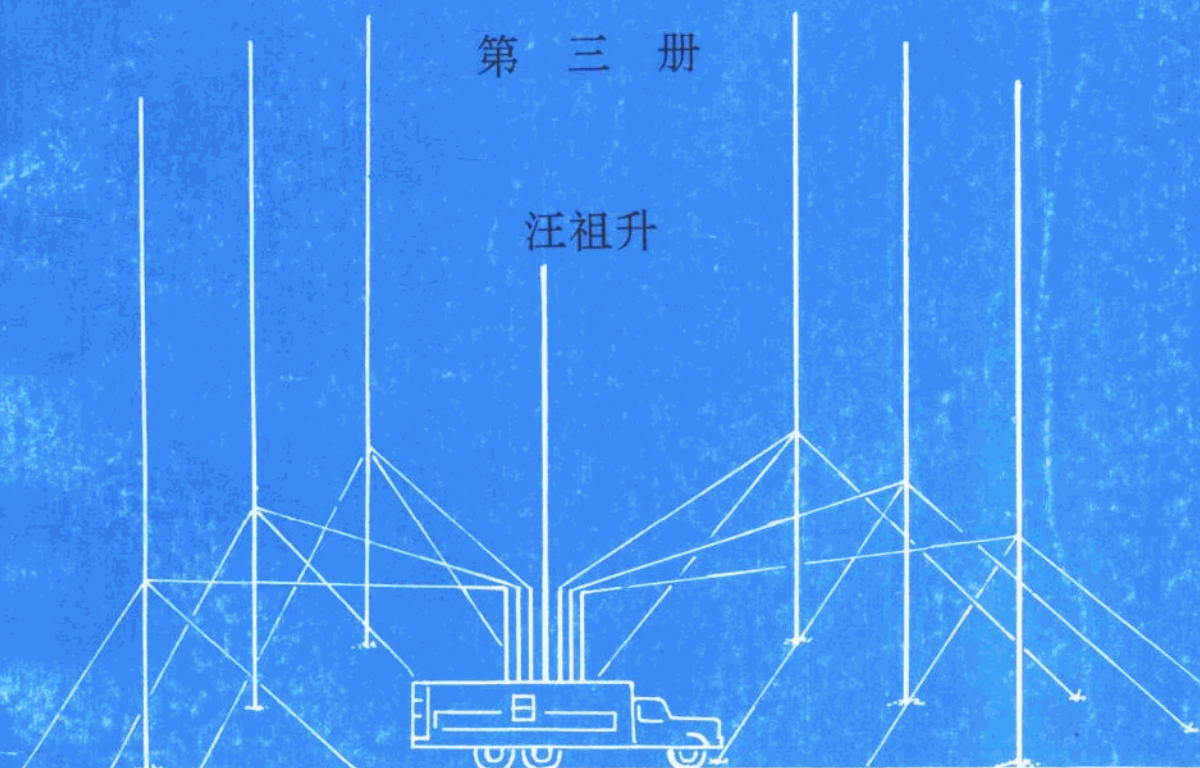


无线电测向

第三册

汪祖升



WUXIAN DIANCEXIANG

中国人民解放军信息工程学院

序 言

一九八八年六月，我们根据当时中国人民解放军信息工程学院“无线电测向原理与设备”课程教学大纲编写出版了“无线电测向”第一册、第二册。近年来由于无线电测向事业的蓬勃发展，我们修订了“无线电测向”课程的教学大纲，据此又新篇“无线电测向”第三册，与原编的两册内容衔接，构成一部以通信测向为主，又包括雷达测向及多波测向的理论和技术的教科书。这是一套“比较全面系统，内容比较新的教科书”。适合于作为高等院校无线电监测专业，电子对抗专业等专业的教材或教学参考书，亦可供从事这些专业方面工作的科技人员参考。

全套书共分十五章，即：绪论、电磁场的一般知识、无线电测向的天线体系、测向天线体系的计算、无线电测向机原理、测向新技术、无线电测向误差分析、无线电测向机的灵敏度、无线电测向机的测试、地面无线电测向机使用中的几个问题、雷达测向、电波场模型、双射线波场中的零孔径示向度、波前分析测向基础、多波测向等问题。

本书编写中有如下考虑：

在内容选择上，主要是考虑培养无线电监测专业、电子对抗专业的高级技术人才的需要，同时也兼顾了我国从事无线电监测，电子对抗和无线电导航等方面工作的科技工作者的需要。本书既较详细地介绍了传统测向的基本理论，设备和调整测试、使用方法，也较全面地介绍了波前分析测向和谐估计测向理论与方法。

目前国外的无线电测向技术，已采用全自动化无人值守测向网，传统测向方法已趋完善，到达时间差法测向，干涉仪测向，自适应多普勒测向，跳频测向都已付诸使用，新型波前分析测向机也已付诸使用，空间谐波估计法的多波测向技术也有迅猛发展。可望多信道谐波估计测向机将代替传统测向机。为了实现从传统测向向最新多波测向的过渡，故新篇本书的第三分册。可以预言，未来的远程中、短波测向，将可能是侦测合一、多波测向、单站定位的测向系统取代或充实目前的侦测系统。

本书以介绍无线电测向的基本理论为主，同时注意了理论联系实际；既注意了测向理论的完备性，又注意了各种内容安排上的相对独立性。全书包括三册。

第一册包括第一章至第六章。在第一章绪论中简要地介绍了无线电测向的一些基本概念和概况，第二章简要地介绍了电波传播的一般知识，为学习测向奠定了必要的基础。第三、四章分别介绍了测向的天线理论及其计算，它是无线电测向的必要组成部分。第五、六两章分别介绍了各类传统通信无线电测向机的工作原理及测向新技术，这两章是传统测向的中心内容，取材力求全面，系统和新颖。

第二册包括第七章至第十章。第七章专门分析测向误差的基本理论，它是分析测向质量的理论依据；第八章介绍了各类无线电测向机的灵敏度，抗扰度；第九、十两章介绍了测向机的测试与使用问题。

第三册包括第十一章至第十五章。第十一章介绍了雷达测向的原理与设备；第十二章和第十三章分别介绍了电波场模型和双射线波场中的零孔径示向度，为波前分析测向和多波测

向奠定必要的理论基础；第十四章介绍了波前分析测向基础，波前分析测向机。第十五章多波测向，介绍了目前研究热点的几种空间谱估计算法，最后给出了几种典型算法的性能比较。

本书的第一、二册出版前，有幸请三局十处当时的总工程师吴承光（高级工程师），和我院当时的院长蒋维汉审稿。审稿中，吴承光总工程师对原稿提了许多极其宝贵的意见，还提供许多新资料。蒋维汉院长审稿，对本书的出版起了很大的促进作用，编者在此向他们表示衷心的感谢！遗憾的是，本书的第三册现出版，由于时间紧，加之他们也均已退休，未能敬请审阅，无疑是本书的一大损失。

本书编写过程中，部资料室、科技装备处、部三局、第五十七研究所、第三十六研究所，通信工程学院、电子工程学院、华中理工大学，国营第九一三厂、国营第九一四厂等单位都曾给予了热情的帮助。许多单位的领导、专家和同志们都非常热情地支持了本书的编写工作。吴承光、杜明忠、崔树桢、朱锦生、肖先赐、许春、王崇原、陈起、李家庆、王开运、何诗银、许光宁、彭孝平、谭道专等同志都对本书的编写提供过宝贵资料和宝贵意见。杜明忠、陈勇同志热情地支持了本书的出版、发行工作，在此一并致以衷心的感谢！

本书是在本院各级领导和许多同志的大力支持下完成的，系领导、教研室领导、教保处及院印刷厂的领导和同志们都热情地支持了本书的出版工作，在此一并致谢！

由于本人水平的限制，加之时间仓促，书中难免有错误、遗漏和不妥之处，诚请专家读者批评指正。

编者 1996年8月

目 录

第十一章 雷达测向	(1)
§ 11—1 概述	(1)
§ 11—2 搜索法测向	(5)
§ 11—3 全向振幅单脉冲测向法	(11)
§ 11—4 线性相位多模圆阵测向法	(18)
§ 11—5 宽角透镜馈电的波束测向法	(25)
§ 11—6 雷达定位法	(29)
习题与思考题	(45)
第十二章 电波场模型	
§ 12—1 引言	(47)
§ 12—2 电波场模型的主要特征	(47)
§ 12—3 波前和波前曲率	(48)
§ 12—4 单射线的等相位线	(50)
§ 12—5 两射线波场特性	(50)
§ 12—6 三个以上的射线的波场特性	(54)
§ 12—7 垂直面的电波场	(55)
§ 12—8 图形重复的意义	(55)
§ 12—9 计算机绘图	(55)
第十三章 双射线波场中的零孔径示向度	
§ 13—1 引言	(67)
§ 13—2 零孔径示向的基本理论	(67)
§ 13—3 等幅度统计分布	(72)
§ 13—4 具有瑞利衰落的统计分布	(75)
§ 13—5 结论	(77)
第十四章 波前分析测向基础	
§ 14—1 引言	(79)
§ 14—2 多射线波——场分解技术	(79)
§ 14—3 理想条件下的波前分析	(88)
§ 14—4 非理想条件下的波前分析	(97)
§ 14—5 波前分析测向机	(110)
第十五章 多波测向	
§ 15—1 引言	(117)
§ 15—2 多波测向法概论	(118)

§ 15—3 谱估计测向法概述	(123)
§ 15—4 最大似然估计法	(126)
§ 15—5 最大熵功率谱密度估计法	(129)
§ 15—6 MUSIC 算法	(134)
§ 15—7 空间平滑法	(140)
§ 15—8 改进的空间平滑法	(146)
§ 15—9 模糊控制与 FUZZY—MUSIC 算法	(149)
§ 15—9—1 模糊控制的基本原理	(150)
§ 15—9—2 FUZZY—MUSIC 算法	(151)
§ 15—9—3 谱估计算法实例	(154)
§ 15—10 根 MUSIC 算法	(160)
§ 15—11 ESPRIT 算法	(164)
§ 15—12 数据矩阵的奇异值分解法	(169)
§ 15—13 几种谱估计算法性能比较	(175)
附录	(183)
谱估计的计算机程序	(183)
参考文献	(197)

第十一章 雷达测向

§ 11—1 概述

一、一般概念

雷达 (Radar) 是英文 Radio Detection and Ranging 的缩写。原意是无线电探测和测距。随着雷达技术的发展, 雷达已经是不仅可测量目标的方位、距离和仰角, 而且还可以测量目标的速度, 航向, 并且可从回波中提取更多的有关目标的信息。

雷达是利用目标对电磁波的反射 (或散射) 现象及天线的锐方向性来发现目标及测量其位置参量的。飞机、导弹、人造卫星、舰艇、车辆、炮弹及建筑物、山川、云雨等都可作为雷达的探测目标。

在雷达的应用中, 常应用极坐标系统来测定目标的位置, 该系统中任一目标可以用三个座标参量来描述, 如图 (11—1), 这些参量是:

斜距 R ——雷达到目标的最短距离, 单位公里或海里。

方位角 θ ——地球子午线指北方向顺时针方向旋转至目标斜距在水平面上的投影间的夹角, 单位为度。

仰角 β ——在电波传播面内, 电波入射线与其在水平面上的投影之间的夹角, 单位为度。

图 (11—2) 是脉冲雷达组成的简要方框图, 它由定时器、发射机、天线、接收机、显示器、收发转换开关及电源等部分组成。

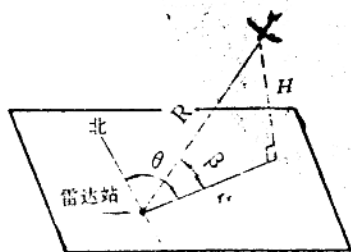


图 11—1 雷达测定的坐标

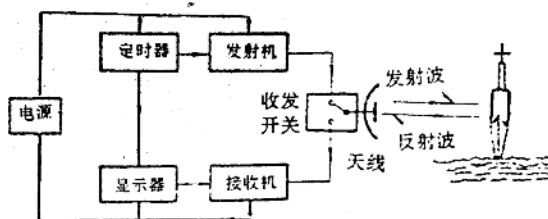


图 11—2 脉冲雷达组成方块图

定时器产生周期性定时脉冲 (如图 11—3 (a)) 以控制发射机与显示器在同一时间内工作。

发射机在定时脉冲的控制下, 产生周期性的射频脉冲, 经过收发转换开关送到天线发射出去。

雷达天线具有很强的方向性, 将来自发射机的射频能量从一个很狭窄的波束向外辐射。因此既提高了对目标的探测能力, 也可据天线的方向特性确定目标的方向。当天线辐射出去的

电磁波遇到目标时就产生散射，使一部分能量由目标反射回来而被雷达天线所接收。

接收机的作用是接收来自目标反射的信号及发射机发射射频脉冲信号时经收发转换开关漏入的发射信号，并将这些信号放大，检波出视频脉冲信号输出到显示器。

雷达显示器由阴极射线管做成，显示器受到定时信号触发时，就开始工作。回波信号到来时，显示器的屏幕就显示出目标所对应的位置。最常用的雷达显示器是平面显示器，它能够显示目标的距离和方位，图 11—4 是雷达工作区内海上目标显示图形的一例。屏幕中心代表雷达站所在的位置，目标以亮点显示出来，亮点与圆心之间的距离就是目标至雷达的距离，可由径向距离标志圈读出；它与正北方向间的夹角，以顺时针方向读出，就是目标的方位角，可由方位度盘刻度读出。

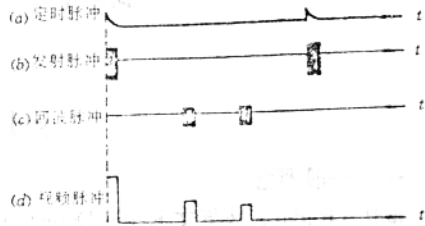


图 11—3 雷达各部分的时间关系

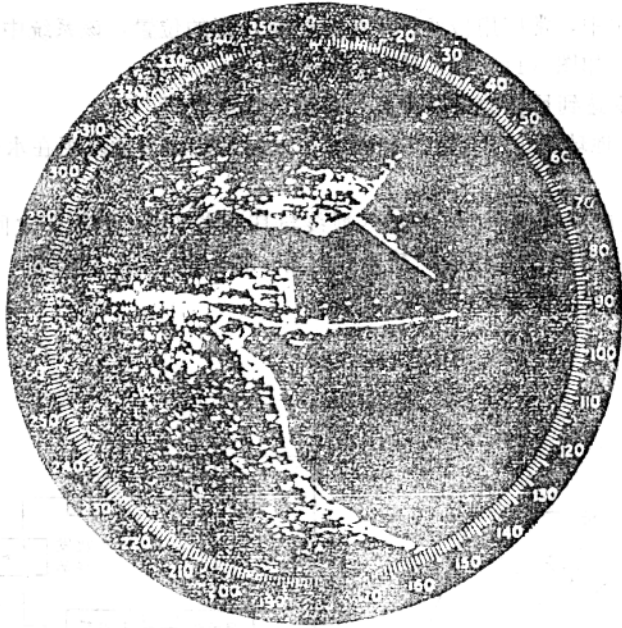


图 11—4 环视显示器上的目标图形

收发转换开关在控制信号作用下，可以使天线自动准时和发射机或接收机相联接。以实现收、发共用天线。即是当发射脉冲到来时，天线与发射机相联接，使强信号顺利通过开关由天线发射出去，同时避免了损坏接收机；在发射脉冲间隙期间，收发转换开关自动实现使天线与接收机相联接，这就使天线接收到的微弱回波信号顺利地送到接收机，而避免了发射机的吸收。

根据图 (11—3 (d)) 可以测量出回波脉冲滞后于发射脉冲的时间，又知电磁波的传播速

度 V 等于光速, 故可以求出目标到雷达间的距离 R ,

$$R = \frac{V t_r}{2} \quad (11-1)$$

其中 V ——光速, $V=3 \times 10^8$ 米/秒。

t_r ——电磁波从雷达到目标且又返回到雷达的传播时间。单位为秒。

在雷达技术中, 时间单位常用微秒, 若回波脉冲滞后于发射脉冲一微秒, 所对应的目标斜距 R 为 150 米。

目标角位置是指方位角或仰角, 雷达测量这两个角位置都是利用天线的方向性来实现的。雷达天线将电磁能量聚集在窄的波束内, 当天线波束的对称轴对准目标时, 回波信号最强, 如图 11-4 的目标 1; 当天线波束轴偏离目标时, 回波的信号减弱, 如图 11-4 中目标 2。根据接收回波最强时天线波束的指向, 就可以确定目标的方向。无论是测量方位角还是仰角, 都可以用这一方法。

角坐标的单位通常用弧度、度或密位来表示。圆周的 $\frac{1}{360}$ 为 1 度, $\frac{1}{6000}$ 为 1 密位。因此角度的各种单位之间有如下关系:

$$1 \text{ rad} = 57.3^\circ, 1^\circ = 16.7 \text{ 密位}, 1 \text{ 密位} = 0.06^\circ.$$

有些雷达除确定目标位置外, 还能测量目标的径向速度, 这是利用物理上的多普勒效应完成的。当目标与雷达之间存在相对速度时, 接收到回波信号的载频就会相对于原发射信号的载频产生一个频移, 该频移数值为

$$f_d = \frac{2V_r}{\lambda} \quad (11-2)$$

其中 f_d ——多普勒频移 (Hz);

V_r ——目标相对于雷达的径向速度 (米/秒);

λ ——发射信号的载波波长 (米)。

二、雷达的主要性能参数

雷达测向是技侦的一个部分, 对每个测向系统技术指标的要求取决于它的用途、性能要求、有效空间及成本等因素。这里介绍雷达测向的几个主要技术指标。

1. 瞬时视野和雷达探测范围

瞬时视野是指瞬时角度覆盖范围。对于单波束搜索天线, 瞬时视野为一个波束宽度, 而圆天线阵的瞬时视野为 360° 。

雷达探测范围是雷达对目标进行连续观测的空间域, 它取决于雷达的最小作用距离和最大作用距离, 仰角和方位角的扫描范围。有的雷达还须考虑对目标的跟踪范围。

2. 测角精度: 测角精度用测角误差来度量, 它包括系统误差和随机误差。系统误差是由于测向系统失调或系统的某些缺陷引起的, 在给定工作频率、功率电平及环境条件下, 它是一个固定偏差。随机误差主要是由于测向系统的内部噪声、电波传播等原因引起的。通过统计处理可以减少随机误差, 因此测角精度又可分为短期精度和长期精度两种。短期精度用实时测量误差表示; 长期精度用经过积累处理和平均处理后的误差表示。

3. 分辨率: 表示雷达区分点目标在位置上靠近的能力, 称为分辨率。两个点目标可能在距离上和角度上很接近, 因此又分为距离分辨率和角度分辨率。

距离分辨率是指对在同一方向上两个目标之间最小可区别的距离。角度分辨率是指在相同距离上的两个不同方向的点目标之间最小能区别的角度，在水平面内的分辨率称为方位分辨率，在传播面内的分辨率称为高低角（或仰角）分辨率。

有的雷达还能测量目标的径向速度，能够区分的最小径向速度叫做速度分辨率。

分辨率有时也称分辨度或分辨力。

4. 角度搜索概率与角度搜索时间

角度搜索概率表示对于给定的雷达，侦察天线波束与雷达波束重合可能性的大小。又称做角度（方位）截获概率。对于普通的警戒搜索雷达，可以取得低一些；对于火控雷达，特别是重点威胁，搜索概率必须为 100%，即全概率搜索。

搜索时间是指对于给定的雷达，要获得一定的搜索概率所需要的时间。又叫角度截获时间。在一般情况下，对于电子情报侦察，可允许搜索时间长些；对于电子支援侦察，则要求实时截获信号，对搜索时间提出严格要求，甚至要求单个脉冲截获，其最大搜索时间为一个脉冲重复周期。此时，对于连续照射的雷达，单个脉冲的角度搜索概率为

$$P_{1a1} = \theta_1 / 360^\circ \quad (11-3)$$

其中 θ_1 为瞬时视野。可见侦察天线的视野越宽，则单个脉冲角度搜索概率越大。

5. 虚警概率

虚警概率是在没有目标时，雷达却认为有目标存在的概率，要求越小越好。

6. 测向系统灵敏度

测向系统灵敏度是用来度量整个测向系统（天线和接收机、显示器）探测微弱信号的能力的参量，即

$$P_{min} = P_{rmin} / Gr \quad (11-4(a))$$

或

$$P_{min}(dBm) = P_{rmin}(dBm) - Gr(dB) \quad (11-4(b))$$

其中 P_{rmin} —— 测向接收机灵敏度；

Gr —— 侦察天线增益。

例如 $P_{rmin} = -60dB$, $Gr = 20dB$, $P_{min} = -80dBm$ 。而测向天线的增益又分为两类：低增益天线在 0dB 左右；高增益天线在 20dB 左右。

此外，雷达的技术指标还有工作频率范围；调制波形；天线方向性图和扫描方式；发射功率；显示器的形式；录取手段；抗干扰能力；可靠性及体积、重量等。

三、雷达测向方法的分类

可以按照不同的准则来对雷达测向方法分类。

（一）按时域分类

1. 顺序测向法 顺序测向是通过窄波束天线在给定空间内连续搜索（扫描），或者通过开关控制波束转换，测量目标所在的方向，也称为搜索法测向。它是一种传统的测向方法，优点：设备简单，体积小，重量轻。缺点：瞬时视野窄，截获时间长，难以满足现代电子环境的要求。

2. 同时测向法 同时测向法是采用多个独立波束覆盖给定的空域，或者采用阵列天线同时产生多个波束覆盖给定的空域，也称作非搜索法或多波束测向法。

同时测向法的瞬时视野宽，截获时间短，角度截获概率高；但技术、设备复杂。随着天线和波束形成网络技术的发展，这一缺点将逐步克服。

(二) 按测向方法分类

1. 振幅测向法 根据侦收信号幅度相对大小来判明信号到达方向的方法,称为振幅测向法。它包括最大信号法、等信号法、比较信号法等。

最大信号法用于搜索体制,它的优点是设备简单,信噪比高,侦察距离较远;缺点是测向准确度差。

比较信号法广泛用于非搜索体制,它是通过比较相邻波束侦收信号幅度的相对大小来确定辐射源所在的方位。它的优点是测向准确度高,缺点是设备复杂。

等信号法只用于对辐射源的跟踪,如反辐射导弹,对雷达实施被动跟踪等。

此外还有最小信号法,但由于它的系统灵敏度低,在雷达测向中很少使用,这一点也是雷达测向与通信测向的差别。

2. 相位测向法 它是采用间隔天线同时测量同一辐射源的到达电磁波的相位差来确定辐射源的到达方位角的。也可以用相位差作误差信号驱动天线,对辐射源实行被动跟踪。

振幅测向法与相位测向法的比较 这两种测向方法相比,前者测向精度较低,但它的设备较后者简单,因此在现有的测向技术中仍被广泛采用。相位测向法的优点是测向精度高,其中,数字式相位干涉仪已获得迅速发展,并广泛用于高精度测向和定位。

§ 11—2 搜索法测向

搜索法测向是通过控制侦察天线波束在 $0-360^\circ$ 方位范围周期性转动,或者在特定扇形区域内往返转动来搜索雷达信号,并测量它的方位角,具体实现方法有两种:机械搜索法和电控搜索法。机械搜索法是用电动机带动侦察天线转动的一种常用的搜索方法。电控搜索法是通过采用相控阵天线来实现的方法,即是通过控制天线阵元的电流相位来操纵波束的转动,由于宽频带相移器成本很高,故它付诸实用困难较多。因此只讨论机械搜索法测向。

雷达搜索的目标是物体,它不可能瞬时消失。侦察搜索的目标是雷达发出的电信号,可能瞬时消失,因之容易丢失目标,因此,截获概率和截获时间就很重要。在搜索法测向中,习惯上称截获概率为搜索概率,截获时间为搜索时间。若在给定时间内能以 100% 概率截获信号,则称为方位可靠搜索,否则称之为方位概率搜索。这里,我们将分析方位搜索概率;角度分辨率和测角精度。

一、方位搜索概率

侦察天线在旋转搜索过程中,如果被测辐射源是一部跟踪雷达,且已跟踪携带侦察机的平台,那么,侦收到的雷达信号电压包络与侦察天线的功率方向图形状一样,如图 11—5 所示。在接收机门限电平以上的脉冲均能被检测出来。被侦收的信号是一脉冲群,该脉冲群的对称中心所对应的方位角 θ_0 ,就是雷达信号的到达角。从而实现雷达无源定向。

实际工作中,大部分雷达都是处于搜索状态,若雷达信号功率不大,那么,只有当侦察天线主瓣与雷达天线主瓣相遇时,才能侦收到雷达信号。在给定时间内,两个天线波束相遇是一随机事件,由此引出了角度搜索概率。它本质上是两个窗口函数重合概率,是一个几何概率。该概率与侦察天线波束宽度 θ_1 、搜索周期 T_1 、侦察接收机灵敏度、显示时间及被侦察的雷达天线波束宽度 θ_2 、搜索周期 T_2 、信号形式等因素有关。显然,若雷达天线转速高,侦察天线采用慢速搜索可以获得高搜索概率;反之,若雷达天线转速低,采用快速侦察天线搜索,亦可获得高搜索概率。

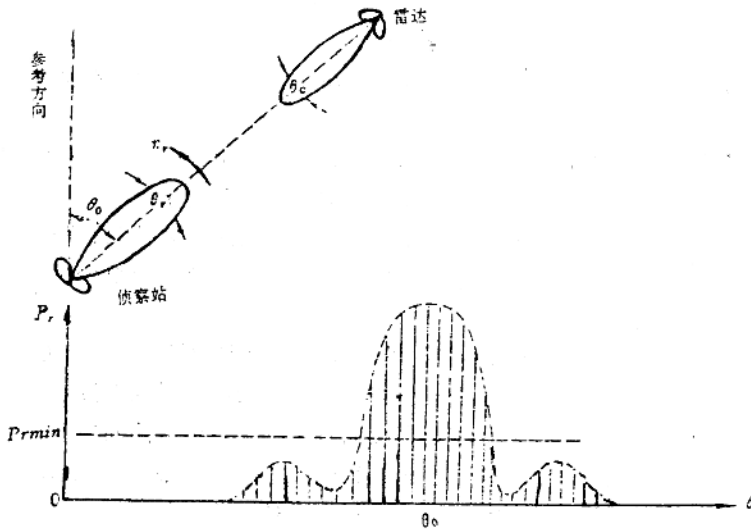


图 11-5 搜索测向示意图

(一) 慢速可靠搜索

在侦察系统的作用距离以内，雷达天线和侦察天线均在各自的方位上作圆周搜索，若侦察天线的转速 V_r 与雷达天线的转速 V_a 满足关系 $V_r < V_a$ (或 $T_R > T_a$)，且要求在侦察天线旋转一周的时间内搜索到雷达信号，则称之为慢速可靠搜索。

当被测雷达天线波束宽度为 θ_a ，它以周期 T_a 进行圆周扫描时，则它每转一周向侦察天线照射一次，照射时间 t_a 即是雷达天线转过一个波束的时间为

$$t_a = \frac{\theta_a}{360^\circ} T_a \quad (11-5)$$

当侦察天线波束宽度为 θ_r ，它以周期 T_R 进行圆周搜索时，则每转一周指向雷达一次，就有一次接收时间，即是侦察天线转过一个波束的时间 t_θ ，

$$t_\theta = \frac{\theta_r}{360^\circ} T_R \quad (11-6)$$

显然，若要求实现可靠搜索，则须在雷达天线旋转一周的时间内，侦察天线的转角不大于一个波束宽度，即是接收时间 t_θ 应大于雷达天线的旋转周期 T_a ，

$$t_\theta \geq T_a$$

将式 (11-6) 代入得

$$T_R \geq \frac{360^\circ}{\theta_r} T_a \quad (11-7)$$

若用直角坐标来表示方位时间的关系，有图 11-6。要求两个波束相遇时间 t_c 应大于侦察设备正常接收和显示所需要的时间 t_s ，方位慢可靠搜索显示的条件是：

$$t_c \geq t_s = NT_r \quad (11-8)$$

其中 T_r ——雷达脉冲重复周期；

N ——显示所需要的脉冲数。

因为侦察天线的搜索与被侦察的雷达天线的扫描是互不相关的,所以在满足可靠条件的前提下,发现信号所需要的时间,取决于侦察天线波束相对于雷达天线波束的起始位置。发现信号所需要的最长时间称为“可靠搜索时间”,用 t_r 表示。因为在侦察接收时间 t_r 内,雷达天线至少旋转一周,故一定能发现信号,而在侦察天线旋转一周的时间内,总有一个接收时间,故发现信号的最长时间,近似地等于侦察天线旋转一周的时间,即

$$t_r \approx T_R \quad (11-9)$$

慢搜索的主要缺点是可靠搜索时间太长。

从式 (11-7) 可见,欲缩短 T_R , 可以采用加宽侦察天线的波束或缩小搜索空间域(采用扇形搜索)。但加宽天线侦察波束,会导致降低测角精度和降低天线增益。而缩小空域可能丢失信号。

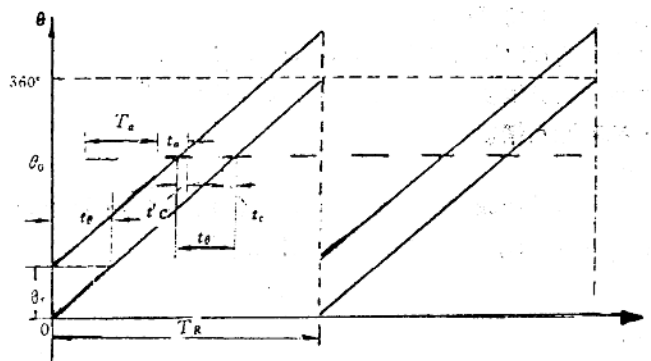


图 11-6 天线方位慢搜索时间图

(二) 方位快速可靠搜索

如果侦察天线转速比雷达天线转速快,而且在雷达天线旋转一周的时间内,必须搜索到雷达信号,则称之为方位快速可靠搜索,其搜索时间图,如图 11-7。可见,必须保障在雷达天线转过一个波束宽度的角度范围内,侦察天线旋转一周,即

$$t_a \geq T_R$$

亦即

$$T_R \leq \frac{\theta_a}{360^\circ} T_a \quad (11-10)$$

同时必须保障可靠地显示信号,接收时间 t_r 应大于显示时间 t_s 。

$$t_r \geq t_s = NT_r$$

$$\frac{\theta_r}{360^\circ} T_R \geq NT_r \quad (11-11)$$

(三) 方位概率搜索

如果侦察天线的转速不满足快搜索和慢搜索的可靠条件或显示条件,则称为概率搜索。概率

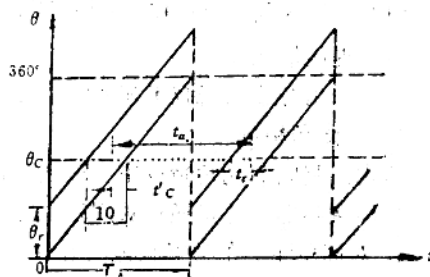


图 11-7 天线方位快速搜索时间图

搜索包括:

(1) 不满足转速条件。即侦察天线旋转周期 T_R , 小于慢搜索可靠条件所决定的时间, 大于快速搜索可靠条件所决定的时间。即

$$\frac{\theta_s}{360^\circ} T_s < T_s < \frac{360^\circ}{\theta_r} T_s \quad (11-12)$$

(2) 不满足接收显示条件:

$$t_c < t_s \quad (11-13)$$

欲解决搜索概率的计算问题, 正确地选定数学模型是极其重要的, 理论分析表明, 侦察机和雷达都处于搜索状态下, 单个脉冲的方位搜索概率, 即角度截获概率为:

$$P_{Id_1} = \frac{\theta_s}{360^\circ} \cdot \frac{\theta_r}{360^\circ} \quad (11-14)$$

因此, 提高单个脉冲的角度截获概率的方法有:

- (1) 增加侦察天线的瞬时覆盖视野, 最好采用全向天线。
- (2) 提高侦察系统的灵敏度, 实现对雷达旁瓣信号的截获。

二、角度分辨率和测角精度

(一) 角度分辨率

搜索法测向的实质是用侦察天线波束, 在空间域内对辐射源连续取样。原则上, 一次取样宽度由 3dB 波束宽度 $\theta_{0.5}$ 决定, 于是角度分辨率 $\Delta\theta$ 等于 $\theta_{0.5}$,

$$\Delta\theta = \theta_{0.5} \approx \lambda/d \quad \text{rad} \quad (11-15)$$

其中 λ ——工作波长;

d ——天线孔径。

可见, 波束越宽, 角度分辨率越低。

若根据瑞利光学分辨率准则, 当信噪比 $S/N \geq 10\text{dB}$ 时, 角度分辨率为:

$$\Delta\theta = 1.22\lambda/d \quad (\text{rad}) \quad (11-16)$$

或

$$\Delta\theta = 70\lambda/d \quad (\text{度}) \quad (11-17)$$

其实, 角度分辨率不仅与波束宽度、信噪比有关, 而且还与侦察天线的旁瓣电平及信号源之间的相对强度有关。

因此, 提高搜索法测向的角度分辨率的方法可概括为:

- (1) 提高天线相对口径 $\frac{d}{\lambda}$, 压窄波束宽度, 但是, 这会增加搜索时间, 或降低搜索概率。
- (2) 提高信噪比。
- (3) 采用旁瓣消隐技术和接收机增益调整技术。

(二) 测角精度

搜索法测向的测角精度主要取决于侦察天线的波束宽度 θ_s 、系统的信噪比 S/N , 及雷达天线的扫描调制等。这可通过对固定雷达, 扫描雷达的测角误差来认识。

1. 对固定雷达的测角误差 在侦察机搜索过程, 若被侦察的雷达天线不动, 并指向侦察机, 那么侦收的信号幅度将受到侦察天线波瓣形状的调制, 如图 11-8。由于存在各种干扰, 实际接收的信号与理想的接收信号之间存在着差别, 因而有测角误差。

搜索法测角常采用最大信号法, 即是以波瓣的最大点的指向 θ_0 表示被测雷达的所在方

向。实际测量中, 采用一个比较电平与接收的信号比较, 用信号电压和比较电平相等的两点所对应的角度, 求其平均值作为 θ_0 。如图 11-8 中, θ_1 和 θ_2 分别表示在没有噪声时, 信号与比较电平的两个交点, 此时主波瓣是对称的, 没有误差。 $\theta_0 = (\theta_1 + \theta_2) / 2$ 。若有噪声存在, 则信号与比较电平的两个交点在 $\hat{\theta}_1$ 和 $\hat{\theta}_2$, 此时有误差存在, 只能求得 θ_0 的估算值 $\hat{\theta}_0$, 即

$$\hat{\theta}_0 = \frac{1}{2}(\hat{\theta}_1 + \hat{\theta}_2) \quad (11-18)$$

令

$$\Delta\theta_0 = \hat{\theta}_0 - \theta_0, \quad \Delta\theta_1 = \hat{\theta}_1 - \theta_1, \quad \Delta\theta_2 = \hat{\theta}_2 - \theta_2$$

则

$$\Delta\theta_0 = \frac{1}{2}(\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2) \quad (11-19)$$

误差的均方值为

$$\overline{(\Delta\theta_0)^2} = \frac{1}{4}[\overline{(\Delta\theta_1)^2} + 2\overline{(\Delta\theta_1)(\Delta\theta_2)} + \overline{(\Delta\theta_2)^2}] \quad (11-20)$$

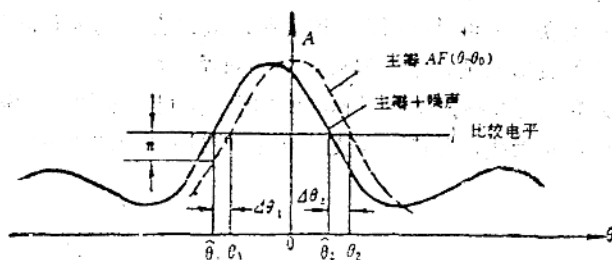


图 11-8 噪声使到达角产生偏移

由于两次测量的时间间隔比噪声的相关时间长, 故可以认为两次测量的误差 $\Delta\theta_1$ 和 $\Delta\theta_2$ 是独立的, 于是交叉项 $\overline{\Delta\theta_1\Delta\theta_2} = 0$ 。因此

$$\overline{(\Delta\theta_0)^2} = \frac{1}{4}[\overline{(\Delta\theta_1)^2} + \overline{(\Delta\theta_2)^2}] \quad (11-21)$$

从第一次测量到第二次测量的时间内, 由于接收机内部噪声引起的角度变化远大于外因引起的角度变化量; 而任何直流成份只能使图 11-8 的波形抬高, 而不会改变它的视在中心。因此, 可以认为 $\Delta\theta_1$ 和 $\Delta\theta_2$ 具有相同的统计特性: 均值为零, 方差相同, 即

$$\overline{\Delta\theta_1^2} = \overline{\Delta\theta_2^2} = \overline{\Delta\theta^2} = \sigma_\theta^2$$

代入式 (11.21), 同时, 用测角标准差 σ_θ 表示每项误差, 则测得的到达角的均方根误差为

$$\sigma_{\theta_0} = \left(\frac{\sigma_\theta^2 + \sigma_\theta^2}{4}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{\sigma_\theta}{\sqrt{2}} \quad (11-22)$$

而 σ_θ 正比例于测量的噪声均方根值 σ_n , 当噪声幅度比主瓣电压最大值 A 小得多时, σ_θ/σ_n 为测量点方向图斜率的倒数 (在门限点, 斜率等于 $n/\Delta\theta_1$), 而斜率的公称值为 A/θ_0 , 于是

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_n}{A/\theta_0} \quad (11-23)$$

代入式 (11-22) 得

$$\sigma_{\theta_0} = \frac{\sigma_n \theta_r}{\sqrt{2} A} \quad (11-24)$$

因为

$$A/\sigma_n = \sqrt{S/N}$$

所以

$$\sigma_{\theta_0} = \frac{\theta_r}{\sqrt{2(S/N)}} \quad (11-25a)$$

或

$$\sigma_{\theta_0}^2 = \frac{1}{2} \theta_r^2 / (S/N) \quad (11-25b)$$

可见，最大信号法测角的均方差与信噪比成反比，与波瓣宽度 θ_r 的平方成正比。

当天线主瓣为高斯形时，测角均方差近似符合式 (11-25b)。

2. 对扫描雷达的测角误差 实际工作中，被侦察的大部分雷达处于扫描工作状态，如搜索雷达，边扫描边跟踪雷达和工作在扫描状态下的跟踪雷达，入射信号是低频调制脉冲列。当侦察天线扫过雷达所在方位时，同时用自己的方向性函数来调制入射脉冲列，所得到的脉冲包络与 $F(t)F(\theta)$ 有关，不再呈高斯形，这时脉冲最大值 A 的偏移既与系统的噪声有关，又与 $F(t)$ 有关，这种波形的视在中心偏移，使测角误差增大。

为了消除被测雷达天线扫描调制引起的测向误差，可以增加一参考支路，如图 11-9a 中的 B 支路。它采用全向天线，并使参考支路与定向支路 A 保持平衡。

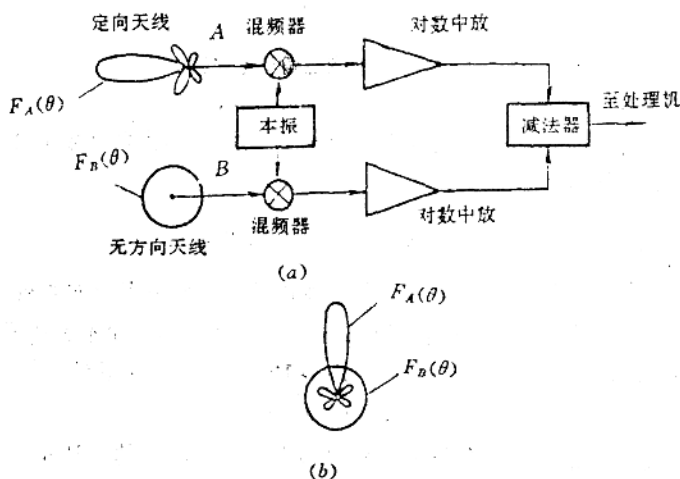


图 11-9 具有参考支路的扫描测向系统

设被测雷达信号为

$$S(t) = F(t)A(t)\cos\omega t$$

其中 $F(t)$ —— 被测雷达天线的方向性函数；

$A(t)$ —— 脉冲包络函数；

ω ——被测雷达信号载波角频率。

定向支路 A 的对数中放输出电压为

$$u_A = \lg[K_A F(t) A(t) F_A(\theta)]$$

其中 K_A ——定向支路 A 的增益；

$F_A(\theta)$ ——定向天线的方向性函数。

参考支路 B 的对数中放输出电压为

$$u_B = \lg[K_B F(t) A(t) \cdot 1]$$

其中 K_B ——参考支路 B 的增益。

将 A 支路和 B 支路的输出加于减法器，则减法器的输出为

$$u_0 = u_A - u_B = \lg\left[\frac{K_A}{K_B} F_A(\theta)\right] \quad (11-26)$$

可见，引入参考支路 B 之后，消除了被测雷达天线扫描调制和幅度变化对测角精度的影响。若调整到两个支路为幅度平衡 ($K_A = K_B$)，则相减器输出只与定向天线的方向性有关。

此外，还可利用这种方法来抑制侦察天线的旁瓣和后瓣。原理如下：

调整两个支路中接收机的增益，使之当定向天线用旁瓣和后瓣接收信号时，定向支路 A 输出的脉冲信号小于全向支路 B 输出的脉冲信号，而只有当定向天线的主瓣接收信号时，定向支路的输出脉冲大于参考支路的输出脉冲信号，如图 11-9b。利用逻辑电路，使定向支路 A 输出的脉冲大于参考支路 B 的输出的脉冲时，有脉冲输出，否则，无脉冲输出。这样就可以做到只用定向天线的主瓣定向，而抑制了定向天线的旁瓣和后瓣对测向的影响。

综上所述可见，搜索法测向采用最大信号法，测角误差主要由侦察天线的波束宽度 θ 和信噪比 S/N 来确定。经验表明，在低信噪比的条件下，若不采用特殊的信号处理技术，由操纵手测量，测角误差约为侦察天线波束宽度的三分之一；若采用特殊信号处理技术，测角误差可减少至侦察天线波束宽度的十分之一。

§ 11-3 全向振幅单脉冲测向法

由于搜索法测向的瞬时视野和角度分辨间存在着矛盾，于是就出现采用多波束全向覆盖的测向方法。全向振幅单脉冲测向法是这种体制的一种典型的测向方法。这种方法是用多个独立的天线产生多个独立的两两相邻接的波束，通过相邻波束接收同一信号的相对幅度来确定待测信号的所在方位。它实质上是一种瞬时测向技术，可以在接收机的前端提取每个脉冲的角度信息。从而用单个脉冲的角度信息来稀释信号流。

一、工作原理

全向振幅单脉冲测向机通常是由多元天线和多信道接收机所组成，尽管该测向系统的测角精度和分辨率随天线元数目的增加而提高，但是同时也导致系统的复杂性也增加。因此，一般只采用四元或六元或八元天线及相应数量的多通道接收机所构成。

在雷达告警系统中，广泛采用四元天线的全向振幅单脉冲测向机，其原理方框图如图 11-10。每个天线元覆盖方位角为 90° ，相邻两波束轴线间的夹角称为倾斜角，记作 θ ，该倾斜角亦为 90° 。天线的轴线、波束交点与原点的连线将全方位分成八个方位区域，每个方位区包含 45° 的范围。每元天线后接一个接收通道。通过相邻通道输出的信号幅度的比值来确定到达信号的示向度。

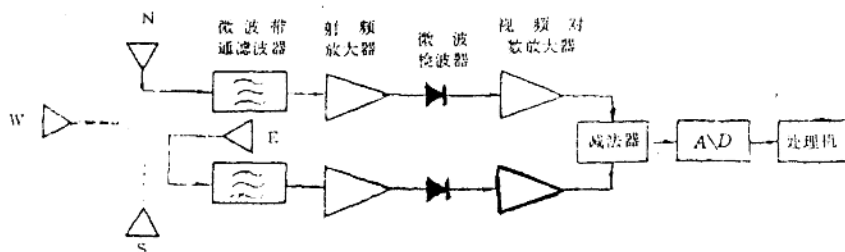


图 11-10 四个天线全向比幅单脉冲测向系统简化方框图

图 11-10 中，每个天线元接收到的同频信号，首先经过微波带通滤波器，该滤波器限定了系统的工作频率范围（选为侦察频段）。然后加入低噪声射频放大器，该放大器放大信号，同时抑制干扰，从而提高接收机的灵敏度。放大器将信号放大到适当的电平后，加到检波器，通常使检波器工作在平方律检波状态。检波器输出的低频信号被加到视频对数放大器，该放大器具有两个功能：1. 放大信号；2. 将信号作对数运算，使求幅度比的除法运算变成减法运算。将各通道接收机调谐至接收同一信号，并将相邻通道的对数放大器输出送到减法器，减法器完成对信号的减法运算，实际上就获得了相邻信道的信号幅度比。该幅度比就反映了被测信号源的方位。然后将它送到 A/D 转换器，进行模数转换，完成量化和编码，变为数字形式，最后送给处理机，进行数据处理，给出示向度。

由于接收通道为宽开晶体视频接收机，故频率截获概率为 1；该测向系统是全向系统，因此方位截获概率也为 1。

二、性能分析

全向比幅单脉冲测向法的性能受多种因素的影响，其中主要的因素包括：天线方向性图、信道的平衡状况以及内部噪声等等。这里将选择适当的函数来逼近天线的方向性图，导出相邻通道的振幅比公式，再考虑相邻信道的电路的不平衡及内部噪声的影响。

1. 振幅比的计算与影响

天线方向性图精确的数学描述比较复杂，为了简化定量分析，可用适当的函数关系来逼近它。通常用正余弦函数或高斯函数来逼近。下面分别介绍。

(1) 正一余弦函数近似法。如果在宽频带范围内，天线波束能近似地保持不变，其宽度精确地等于倾斜角，那末，对于相邻天线元彼此垂直架设的四元天线系统，其方向图可以采用正弦函数来逼近，如图 11-11 所示。波束交点为 3dB 点，若取正北方向为参考方向，则向北的方向性函数可表述为：

$$F_1(\theta) = A \cos \theta \quad (11-27)$$

其中 A ——方向性函数的最大值 ($\theta=0^\circ$ 时)

θ ——示向度。

于是，向东天线的方向性函数为

$$F_2(\theta) = B \sin \theta \quad (11-28)$$

其中 B ——向东天线方向性函数的最大值。

假设两个相邻的接收通道对信号处于接近振幅平衡状态，且增益分别为 K_a 、 K_b 。