

RADIO DIRECTION FINDING

无线电测向

[德] 鲁道夫·格拉鲍 著

徐海湖 译

空军第六研究所

前 言

随着科学技术的进步，特别是随着现代通信技术和计算机技术的发展，无线电测向技术也得到了飞速的发展。新的测向体制和测向方法应运而生。宽频带、高精度、高时效、微机控制的各种测向设备和测向系统不断出现，并越来越多地应用于无线电监测、电子对抗、交通管制等领域。为了便于从事无线电测向的工程技术人员和有关部门的科研、生产、教学及管理人员更多地了解国外无线电测向技术的发展状况，特翻译了《无线电测向》一书。

本书由正文和附录两部分组成。正文部分是原西德联邦军通信业务局通信电子侦察处处长（后任罗德与施瓦茨电子公司顾问）、电子战专家鲁道夫·格拉鲍（Rudolf Grabau）根据其著《无线电监听与电子战》一书中的一章编写的，连载在《News from Rohde & Schwarz》第123期至130期上。介绍了无线电测向所广泛采用的各种技术和设备的工作原理、适用范围、优缺点和最新动态。内容简明扼要，又较全面系统，并兼有实例。本文由我所高级工程师徐海湖翻译，欧阳志鹏校阅。并请总参第五十八研究所朱锦生研究员进行了审校。

译者在附录部分收录了近年来罗德与施瓦茨电子公司研制开发的七种有代表性测向机技术说明书译文，介绍了高频、甚高频和超高频频段的多普勒测向机及瓦特森——瓦特测向机的工作原理、技术指标、操作及应用。其中附录1由徐海湖译，林瑞华校；附录2由林瑞华译，徐海湖校；附录3、附录5、附录6由徐海湖译，周勇校；附录4由王明涛译，欧阳志鹏校；附录7由徐海湖译，欧阳志鹏校。马昌云为本书的出版进行了编辑。

由于水平有限，书中的错误和不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正。

空军第六研究所

1993年2月

目 录

一、测向和交会	(1)
二、测向技术	(1)
2.1 极坐标方向图测向	(2)
2.2 相位测量测向	(3)
2.3 人工、半自动和全自动测向	(3)
2.4 宽孔径和窄孔径测向系统	(4)
2.5 单站定位 (SSL)	(5)
三、极坐标方向图测向系统	(5)
3.1 采用旋转方向性天线的测向机	(6)
3.2 旋转环形天线测向机	(6)
3.3 可旋转的爱德考克 (Adcock) 天线	(8)
3.4 间隔环天线测向机	(8)
3.5 旋转天线测向机	(8)
3.6 交叉环天线测向机	(9)
3.7 角度计	(10)
3.8 单脉冲测向机	(11)
3.9 相控阵和圆阵天线	(13)
四、采用相位测量的测向系统	(15)
4.1 干涉仪测向机	(15)
4.2 爱德考克 (Adcock) 测向天线	(16)
4.3 多信道测向机	(18)
4.4 转换信道式测向接收机	(19)
4.5 多普勒 (Doppler) 测向机	(21)

五、数字测向技术	(24)
5.1 数字测向结果	(24)
5.2 多波分析	(25)
参考文献	(25)
附录	(26)
附录 1 移动式 HF 测向机 PA510A	(26)
附录 2 VHF/UHF 多普勒测向机 PA100、PA200 和 PA120	(33)
附录 3 VHF/UHF 宽带多普勒测向机 PA055	(42)
附录 4 移动式 VHF/UHF 宽带多普勒测向机 PA555	(51)
附录 5 VHF/UHF 小型多普勒测向机 PA025	(58)
附录 6 VHF/UHF 战术定位测向机 PA1100	(61)
附录 7 综合信号截获系统 PA2000	(66)

一、测向和交会

无线电测向系统用来探测辐射源的方位或位置。为此，可利用测向机测定来自有关辐射源电磁辐射的到达角。与雷达不同，测向机不辐射电磁波，测向是一个无源过程，就辐射源方面来说，它对测向活动既无法检测，也无法阻止。

如图 1 所示，如果测向技术利用几个已知位置辐射源来测定测向 (DF) 系统自身的位置 (例如船上的导航测向系统)，那么，我们称此为后方交会；如果相反，测定某个有关辐射源的位置 (例如海上救生发射机)，则称前方交会。测量者也就称这些测向技术为后方交会和前方交会。

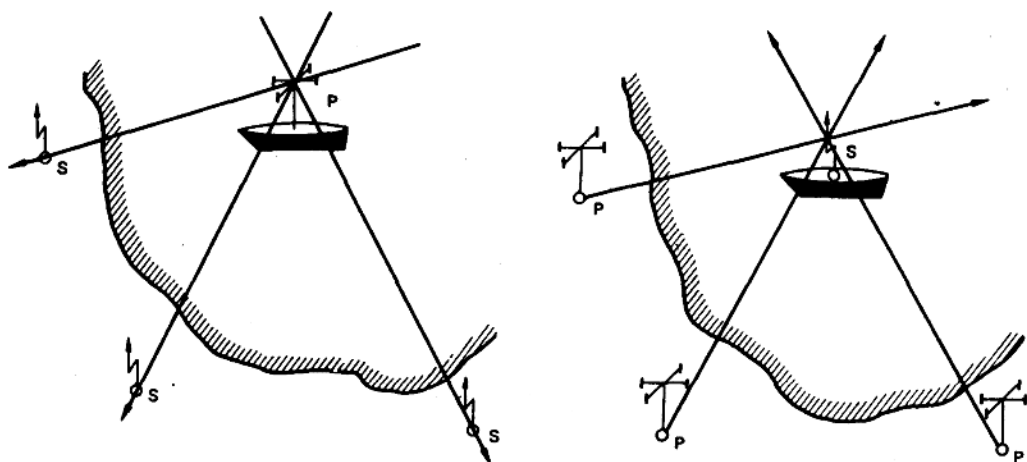


图 1 后方交会和前方交会

人们可以从几个地点或利用移动测向获取被测辐射源的多个示向度来确定其位置。我们把利用多个测向结果确定一个辐射源位置称做交会，如三角交会。虽然测向本身只需零点几秒到几秒钟，但一个有用的交会所需的时间，却与组织效率、现有设备以及控制测向系统的方法有密切的关系。

二、测向技术

从图 2 可以看出，电磁波到达角的方位信息，由电场强度矢量 E 和磁场强度矢量 H (极化矢量) 的方向及电磁波的传播方向 (波前) 给定。所有测向技术本质上都是利用其中一个参量确定方位角。它通过振幅或相位

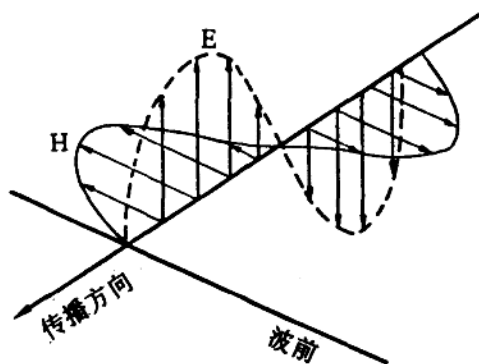


图 2 电磁波的方向参量

测量来完成。较现代化的测向技术则同时测量振幅和相位。由于不同的物理原理，因而测向技术可区分为两类：

- 借助于测量电磁（EM）波在一副或多副天线上感应的电压来进行测向。
- 借助于测量电磁波波前的时间差和相位差来进行测向。

虽然两种测向方法在技术上相似，但以下我们仍将区分为极坐标方向图测向（在振幅敏感天线上进行电压测量）和相位测量测向（时间差测量）两类，如图 3 所示。

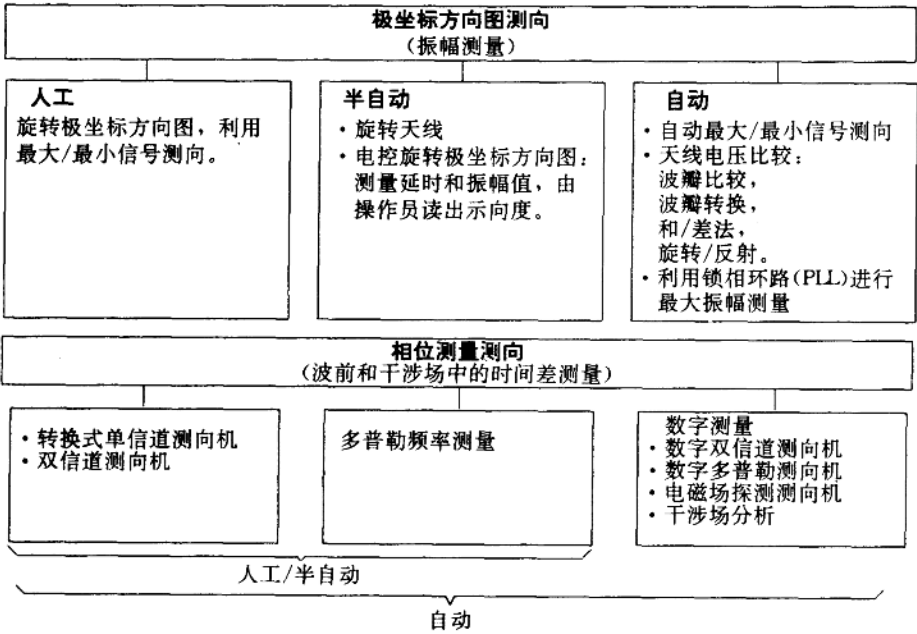


图3 极坐标方向图测向和相位测量测向

任何测向机系统，大都由天线系统、信号调整部分、测向接收机及测向值测定部分所组成。

测向天线系统有振幅敏感和相位敏感两类。

信号调整部分，处理来自天线系统具有测向信息的电压，并使其与接收机的信道数和采用的测向技术相匹配。

就测向接收机而言，可区分为单信道与多信道接收机。这里所说的信道，仅指那些实际参与测向的信道，而不包括辅助信道和监听信道。

测向值的测定，可以是模拟的（例如一种听觉系统或视觉显示），也可以是数字的（自动）。

2.1 极坐标方向图测向

极坐标方向图测向，采用一副具有方向性振幅响应的天线，辐射源电磁场在天线上感应的电压是天线与辐射源之间角度的函数。当天线旋转时，其输出电压按天线的极坐标方向图变化。如图 4 所示，极坐标方向图测向有三类：最大信号和最小信号测向及比较法测向。

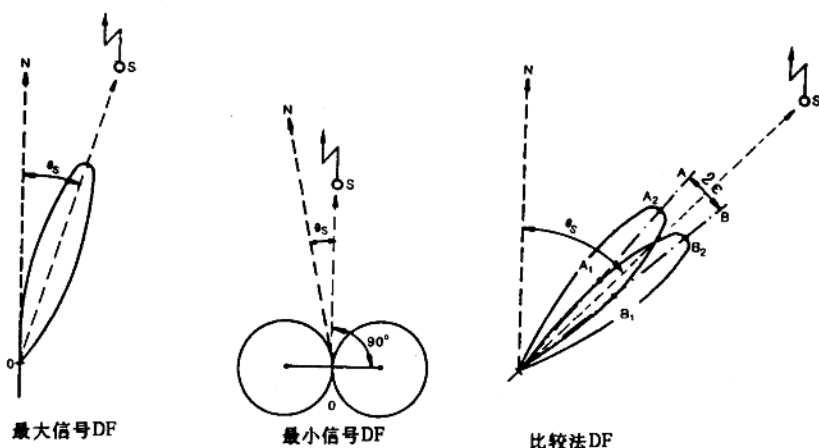


图4 极坐标方向图测向的种类

最大信号测向时，将天线旋转到接收机的输出最大值。此时，穿过天线波瓣的径向中心轴便指向辐射源。这种测向方法的优点是简单，同时由于在天线产生最大响应时取向，因而有处理微弱信号的能力。其缺点是测向精度较低，这是因为在最大值附近，方向图变化缓慢，只有当天线方向变化较大时（半功率点波束宽度的 10% 到 25%），才能测出其变化。

极坐标方向图具有一个或多个最小值的天线，常被用于最小信号测向，例如具有 8 字形极坐标方向图的天线。测向时，旋转天线直至在接收机的输出端出现最小信号值。最小信号测向的精度要比最大信号测向要高得多，这是因为在天线方向图的最小值附近，信号强度变化急剧，天线方向的很小变化，就会引起接收信号强度发生很大的变化。但必须指出，接收信号最小值，噪声将使测向精度稍微降低。

比较法测向，利用两副天线的极坐标图的交叠部分。此时，采用一个比较器，例如确定来自两副天线的信号是否相等。如果利用极坐标方向图的部分，方向的稍微变化，而输出信号变化很大，则测向精度高。与最小信号测向不同，由于它是利用极坐标方向图的最大部分，所以接收信号的电平较高。为了减少这种测向方法的复杂性，可依次将每副天线的输出与接收机连接，但在天线转换期间，如接收信号的振幅变化，则将产生误差。

2.2 相位测量测向

相位测量测向，是通过测量在两副相同天线上两个信号的相位差来确定电磁波的到达角。虽然在两副天线上所感应的信号振幅相同，但由于信号的传播时间不同，其相位也就不同。相位差是波前到达角的函数。如果用相位计测量相位差，当天线旋转至相位差为零的位置时，天线系统便面向辐射源的方向。

如图 5 所示，延迟为 $d \cdot \sin\theta$ ，天线 A1 和 A2 之间的相位差为 $\varphi = (2\pi/\lambda) \cdot d \cdot \sin\theta$ 。当 $-\pi \leq \varphi \leq \pi$ 时，方位角为单值；而当相位差为 φ' 时，则方位角为多值。

2.3 人工、半自动和全自动测向

根据所采用的技术，示向度的确定与操作员承担的责任之间的依赖关系，在程度上是不同的。

人工测向时，操作员需承担诸如转动天线或操作辅助设备等重要任务。他通过听觉系统或视觉显示设备来确定示向度及其置信度。

半自动测向时,某些过程诸如旋转天线或调谐接收机系统是自动完成的。操作员的工作是解读显示结果。他经常借助于类似解算器那样的装置,用手旋转示向度瞄准线,获得数字的角度值。

自动测向时,示向度的获得是自动完成的。

2.4 宽孔径和窄孔径测向系统

理想条件下,在辐射源的远场区,波前的等相位线为平行线。然而,沿着传播途径,波前受到各种干扰,人们必须预计到在接收点的等相位线是弯曲的。如图 6 所示,测向机是把垂直于等相位线的方向取作来波方向的,若波前被干扰,宽孔径天线比窄孔径天线产生的方位角误差要小。

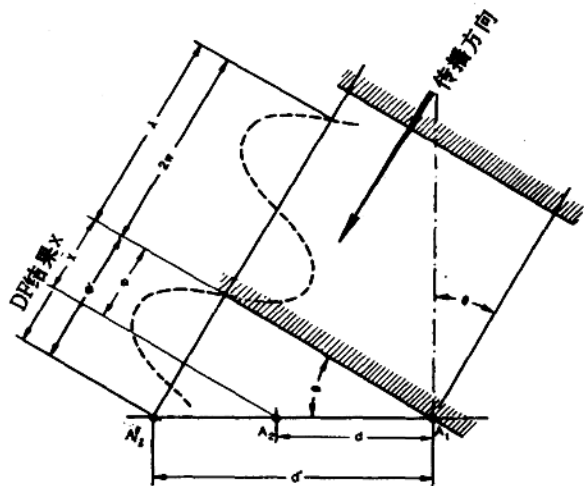


图 5 干涉仪测向的相位差测量

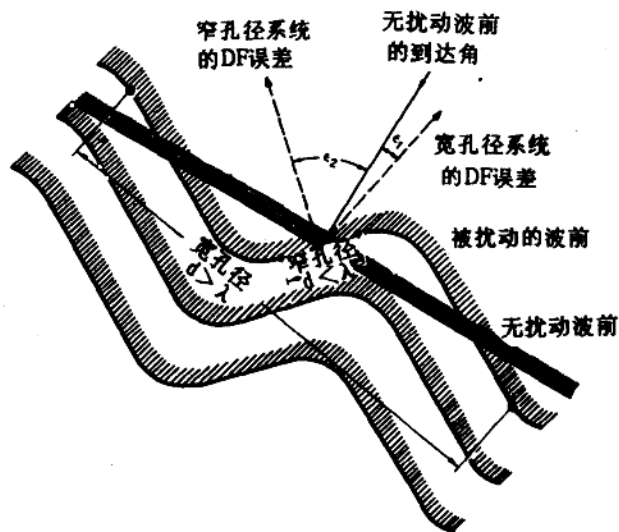


图 6 在电波被干扰的情况下,宽孔径和窄孔径测向系统的比较。

由图 7 可见,测向精度改善的程度,取决于天线系统孔径的直径(相对于辐射源的波长)和被测信号与干扰信号之间的夹角。图中的参量: d/λ 为相对天线基础,反射波与入射波之场强比为 0.1,入射波与反射波之间的相位差为 0° 。

如果每个测向误差按最大值考虑,测量宽孔径系统相对于窄孔径系统的改善因数,可以得

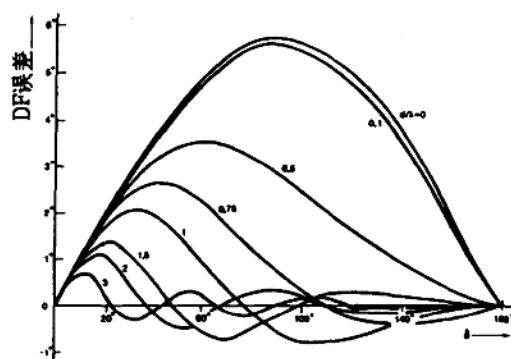


图7 作为入射波与反射波之间夹角 δ 的函数，由反射波引起的测向误差。

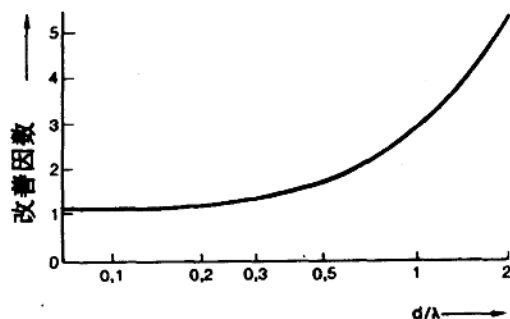


图8 宽孔径系统优于窄孔径系统程度的改善因数

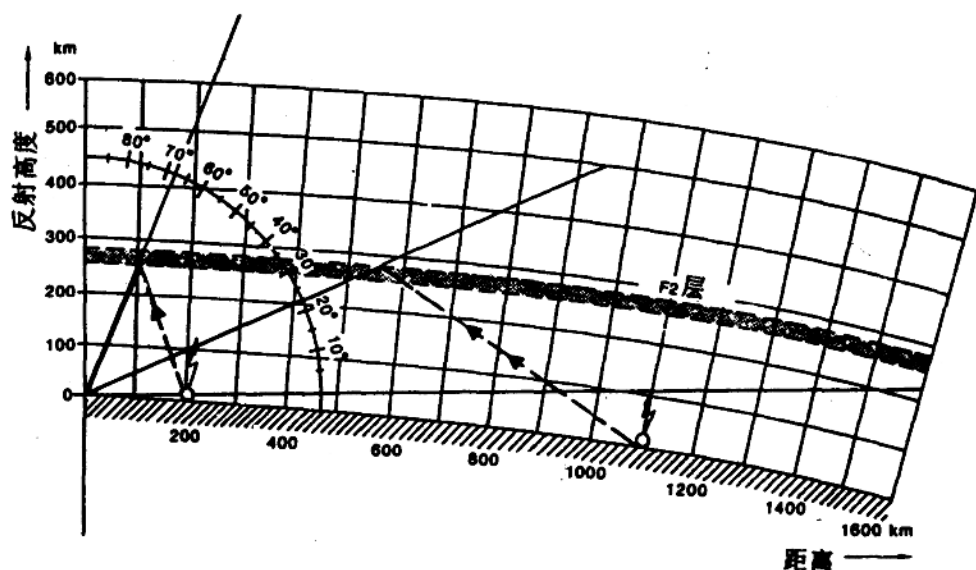


图9 利用单站定位器测距

到图8所示的曲线。直径大于最低工作频率对应波长的天线系统，称为宽孔径(大基础)天线。

2.5 单站定位 (SSL)

单站定位技术只需一个测向台，利用 HF (高频) 的天波就可实现交会 (方位和距离)。如图9所示，除了来波的方位角外，还能测出仰角。如果反射电磁波的电离层高度知道的话，就可以从方位角和仰角计算出辐射源的位置。

利用电离层的数据、电离层的探测结果、或通过对大致在同一地区，工作在同一频率范围的已知辐射源进行交会，都可以确定反射层的高度。

三、极坐标方向图测向系统

许多测向技术采用具有方向性振幅响应的一副或多副天线的极坐标方向图进行测向。系

统的主要构成常为：天线、信号调整部分、测向接收机及测向值测定部分。

3.1 采用旋转方向性天线的测向机

最简单的测向方法是采用一副可旋转的方向性天线。这些 天线应尽可能具有最大的孔径（波束的半功率点宽度很窄）。采用旋转方向性天线的测向机是最大信号测向机。这种方法的优点是天线增益高，能保证最佳的测向接收。主要缺点是：由于天线所必须的强方向性，因而截获概率低。

旋转方向性天线常被用于高于 100MHz 的频率进行测向，UHF（超高频）的高端、SHF（特高频）和 EHF（极高频）频段常采用这种测向方法。测向精度是天线半功率点波束宽度的函数，其值在 $\pm 20^\circ$ 到 $\pm 0.5^\circ$ (rms) 之间。

3.2 旋转环形天线测向机

由单匝或多匝导线构成单一平面并与地面垂直的天线，称为环形天线。如图 10 所示，当天线的方向在电磁场中变化时，天线的磁通匝连数也随着变化。这是因为来自发射机天线呈环形扩散的电磁波平行于地面的缘故。如果环形天线的平面与来波的方向一致，则环形天线的磁通匝连数最大，因而接收的信号也最大。当环形天线的平面与波前的方向垂直时，由于没有磁力线穿过环形平面，天线便接收不到信号。当环形天线平面处于其它方向时，所接收的信号是上述两种情况的中间值。从图 11 可以看出，如果环形天线的直径小于最高工作频率所对应的波长，它产生 8 字形方向图。对于水平极化波，单个偶极子天线有同样的极坐标方向图。但环形天线只能用于接收垂直极化波，因此可以把它看成是“磁偶极子”。这种极坐标方向图能用于最大和最小信号的两种测向。

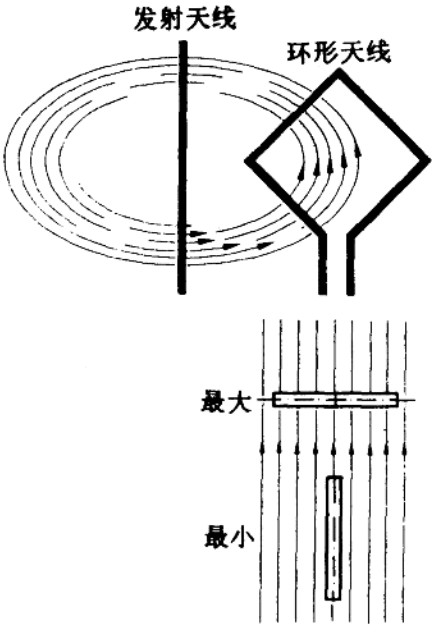


图 10 磁场中的环形天线

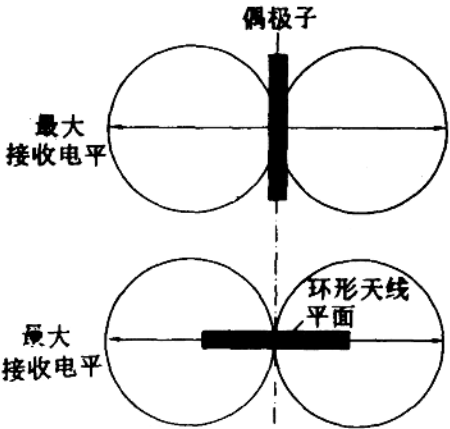


图 11 偶极天线和环形天线极坐标方向图的比较

为了解决示向度的双值性问题，如图 12 所示，在测向中，与环形天线一起同时使用一根

全向的杆状天线。若将两种天线(环形天线和辅助天线)接到接收机的输入端,就形成图 13 的心脏形极坐标方向图。这种方向图只有一个最小值,它与环形天线方向图的最小值相差 90° 。根据不同的频率,来自辅助天线的电压必须用纯电阻调到适当的值。若来自环形天线的最大电压和辅助天线相同,就能产生单一的最小值。但心脏形极坐标方向图的最小值,不如环形天线 8 字形极坐标方向图的最小值尖锐。

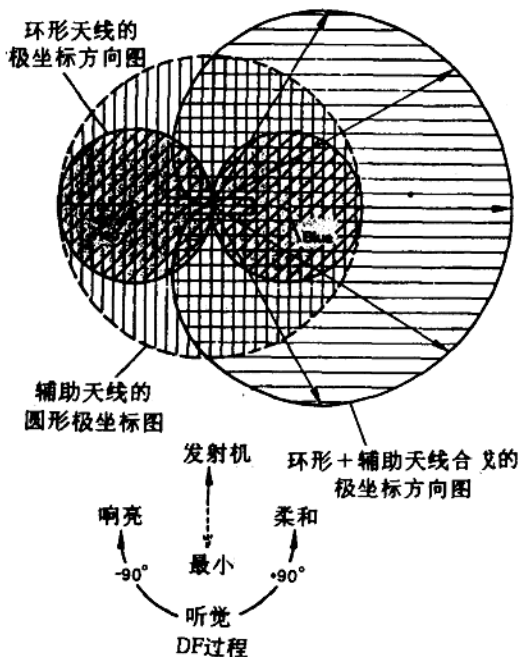


图 13 适当调节杆状天线的输出幅度,将它与环形天线两者的极坐标方向图相加,而得到的心脏形极坐标方向图。

使用上述组合天线进行测向的过程如下:

- 调整频率(调谐接收机并调整辅助天线的电压)。
- 用 8 字形极坐标方向图进行最小信号测向。
- 读出双值的示向度 ($\pm 180^\circ$)。
- 连接辅助天线。
- 将环形天线旋转 $\pm 90^\circ$, 确定音响最大和最小的位置。

由于环形天线的操作过程耗费时间,并且在 HF 范围存在极化误差,所以这种一度曾经普遍使用的方法,目前几乎很少使用,如果多少有一些的话,也只是在 ELF(极低频)、VLF

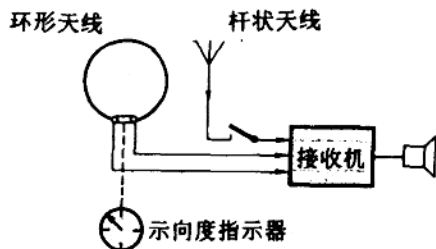


图 12 带有杆状天线(具有圆形极坐标图)的环形天线测向机(当需要时,杆状天线可由开关接入)

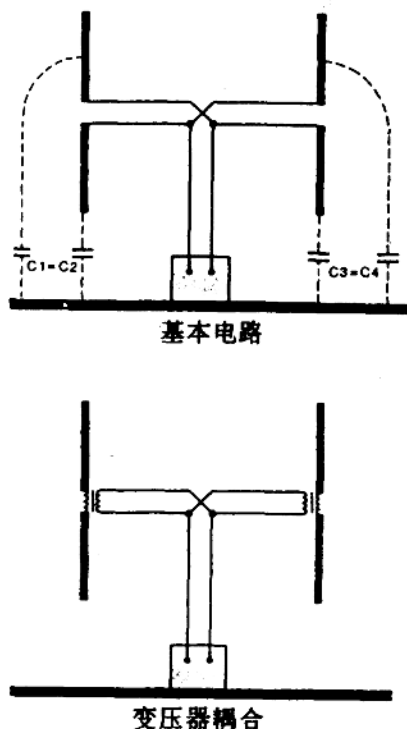


图 14 H 型 Adcock 天线简图

(甚低频)、LF (低频) 和 MF (中频) 频段。然而, 某些特殊情况, 如在近场区域测定发射机的位置 (非法发射台), 还应用这种方法。凡是能够关闭 AVC (自动音量控制) 和有视觉或听觉场强指示器的接收机, 都能用于这种测向, 它所需要的技术设备最少。测向误差在 $\pm 3^\circ$ 到 $\pm 1^\circ$ (rms) 范围内。

3.3 可旋转的爱德考克 (Adcock) 天线

采用垂直的 H 型或 U 型天线, 可以减少极化误差。这种天线得名于它的发明者 Adcock, 它由几个相同的垂直偶极子 (H—Adcock) 或杆状天线 (U—Adcock) 反相连接而成。天线元之间的间隔必须小于波长。如图 14 所示, 由两根天线构成的该类装置, 形成与环形天线相同的水平极坐标方向图。接收机输入端的电压差等于发射机方位角的正弦。转动天线可以取得最小值, 双值性则由接入辅助天线解决。

在 HF 波段, 为了满足最低灵敏度的要求, 天线振子需数米高, 天线之间的间隔也要有数米, 所以利用机械方法旋转 Adcock 天线是复杂的。这样的测向过程本身很耗费时间。正是由于这些原因, 旋转的 Adcock 天线一般已不使用。但相位测量的 Adcock 天线却使用得很普遍。这个问题将在以后讨论。

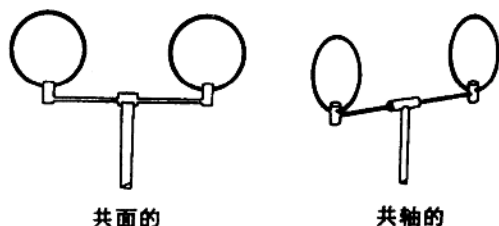


图 15 间隔环天线测向机

3.4 间隔环天线测向机

为了消除旋转环形天线的极化误差, 研究出了间隔环天线测向机。如图 15 所示, 间隔环天线测向机有共面式和共轴式两种。共轴式间隔环天线的极坐标方向图, 在最小值附近变化较尖锐。这些天线连接成能产生一个类似于四叶苜蓿状的极坐标方向图, 有四个最小值。其中两个最小值 (真实最小值) 是由于两个环面与波前垂直 (两个环的电压和相位相等, 但由于反相连接, 所以相互抵消, 故输出为零); 另外两上最小值 (虚假最小值) 是由于环面与波前平行, 两个环接收不到信号。真实最小值的位置与电波极化和波前倾角无关, 因而被用来测向。通过转接环形天线可以区分真假最小值。

由于接收机输入端的电压是两个环形天线的电压差, 所以其灵敏度低于单环天线。这种天线的极化误差小, 在整个仰角范围内灵敏度保持恒定, 因此在 HF 频段, 300 公里范围内, 能获得中等的测向精度 ($\pm 5^\circ$)。但这种天线机械结构复杂, 测向过程耗费时间。

3.5 旋转天线测向机

如图 16 所示, 如果一个方向性天线围绕相适应的驱动系统的垂直轴连续旋转, 就构成了旋转天线测向系统。接收到的信号被旋转的水平极坐标方向图进行幅度调制。从被调制的信号和天线的位置可得到示向度, 示向度显示在

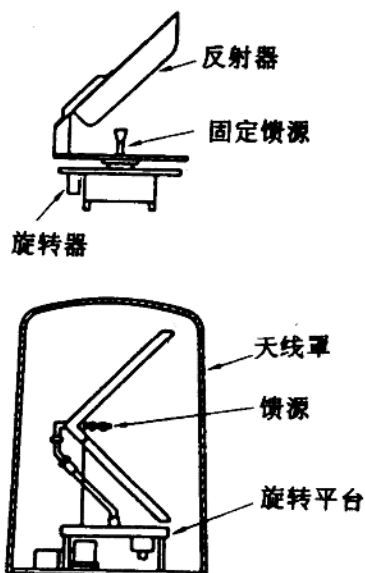


图 16 旋转天线

上图: 在天线馈源上面旋转的反射器;
下图: 在旋转平台上的天线 (馈源在反射器的前面)。

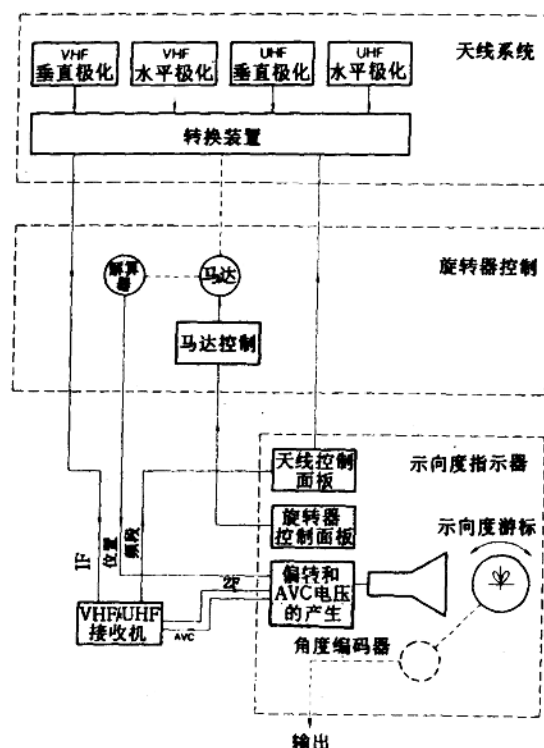


图 17 旋转天线测向系统的方框图

阴极射线管（CRT）或峰值指示器上，如图 17 所示。

这类测向机适合于 VHF 和 UHF 频段的监视系统，并经常用在移动的 VHF 和 UHF 系统中。图 18 所示的一种 VHF—UHF 旋转天线测向机能应用于固定和移动的无线电监视系统。

通常操作员能连续或步进调整角速度。搜索期间，快速旋转的天线具有高的截获概率；低速旋转（如果需要，还可人工旋转）可使操作员更精确地确定示向度，并在最佳天线方向上分析信号。操作员能够选择极化、极坐标方向图和测向值的测定方式（最大值/最小值、和/差、8 字形图/心脏形图）。旋转天线测向机通常用一个天线罩保护天线和转动装置，使它们不受气候影响，同时避免风对天线旋转的影响。

3.6 交叉环天线测向机

前面所述的测向技术都是利用机械旋转天线进行测向，工程复杂，而且测定示向度需要相当多的时间。相比之下，固定天线的设计就大为简单，示向度由各种按不同原理工作的测向求值电路来确定。

如图 19 所示，对于全向测向，最简单的固定式天线系统是由两个正交的环形天线组成，天线按正北方向校准。每个环形天线感应的射频电压馈送到接收机进行放大，放大过程中要求对两路信号的增益和相移保持一致。然后将信号送到 CRT 偏转板。发射台的方向由一条直线显示在荧光屏上。这种测向机，除了能提高测向速度和降低机械结构上的复杂性外，其交叉环天线的尺寸不须象旋转天线那样小。这样，由于天线孔径较大，测向灵敏度便得以提高。

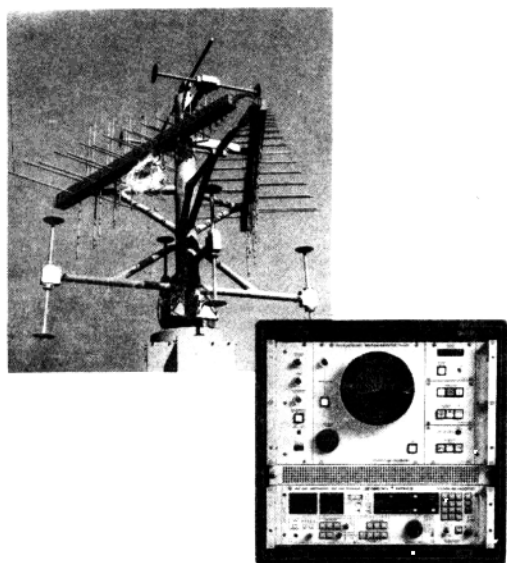


图 18 VHF-UHF 旋转天线测向机 PA003A3。
它包括示向度指示器 PV003、VHF-UHF 接收机 ESM500A、由有源偶极子（20~170MHz）和对数周期偶极子（170~1000MHz）组成的天线系统及旋转器。

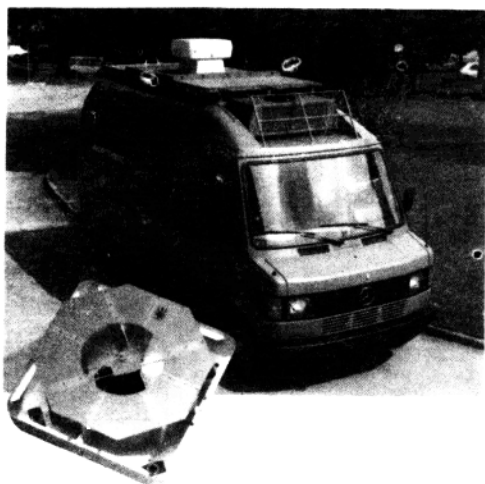


图 20 覆盖频率为 1~30MHz 的移动式 HF 测向机 PA510，轻便小巧的环形天线直接安装在车顶上。

交叉环天线适合于 LF、MF、HF 频段。也可以使用铁氧体环形天线；它们是共面的或交叉的铁氧体杆，天线线圈绕在其上。相对天线的尺寸而言，环形天线具有较高的灵敏度。如图 20 所示，这种天线小巧，便于伪装，可以作成行李架形状。

如图 21 所示，如果天波完全是垂直极化，其极化平面与交叉环天线的一个环面平行，则只在图面中的那个环面才切割磁场。如果是水平极化，则磁场仅与图面正交的那个环面相切割。因此，两者之间的测向误差是 90° 。实际上，天波是椭圆极化，极化矢量的方向不是单一的，测向误差的数值在 0° 到 90° 。由于这种不能消除的固有影响，测向误差的量值也就不能从显示器上确定。因此，环形天线只能用于地波，这对旋转天线和交叉环天线都是一样。

3.7 角度计

当采用一种古老的测向方法——角度计技术时，能量从电磁波的“原”场转移到进行测

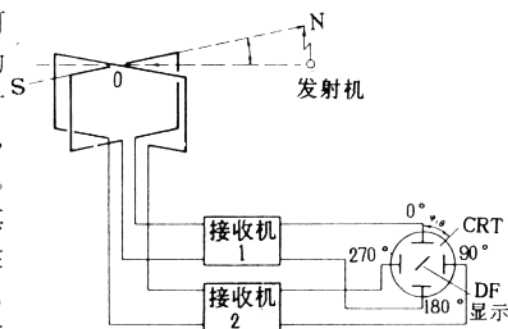


图 19 交叉环天线测向机和
双信道接收机简图

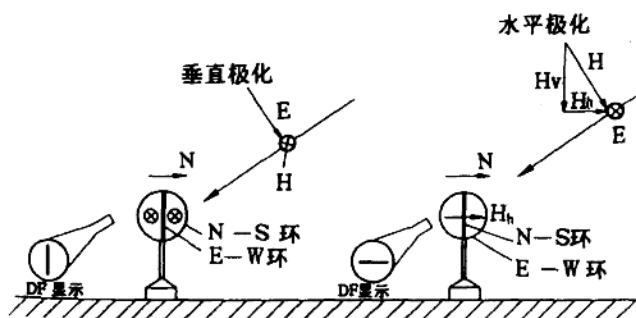


图 21 交叉环天线的极化特性和水平极化与垂直极化的示向度显示

向的“副”场。如图 22 所示，来自交叉环天线的两个电压加到角度计的两个正交的场线圈上。与场线圈电磁耦合的搜索线圈用来进行测向，它起到了旋转环形天线的作用。角度计的输出电压由测向接收机测定。当出现小音点时，由与搜索线圈相连的刻度盘上读出示向度。双值问题可通过连接辅助天线解决。

这种方法的优点是：由交叉环天线的设计或安置所产生的误差能够用角度计补偿技术消除。相对天线原场不必进行误差校正

测量。这种方法的缺点是：如果来自不同方位的几个相近频率的信号同时被接收，产生的寄生电压（同信道干扰）会大得不能获取有用的示向度。这时，小音点变化平坦，致使不可能用听觉测向。

角度计也能同 Adcock 天线一起使用。垂直偶极子或杆状天线按北—南（N—S）或东—西（E—W）方向对称配置，由天线检测到的外部场强在角度计中能够再现。这种测向过程和使用交叉环天线一样。

3.8 单脉冲测向机

以上所述的测向技术，都是利用一副天线或一组天线的方向性，而单脉冲测向技术则至少需要两个极坐标方向图进行交叠，由振幅比较确定来波的到达角。

如图 23 所示，典型的单脉冲方法是从信号振幅的和与差中得到示向度信息。示向度是归一化角函数（振幅差/振幅和）为零时的角度。

如果是从信号振幅的倍增过程中获得角度信息，则这种技术就称为振幅单脉冲测向。如图 24 所示，示向度是两副天线的输出函数相等时所对应的角度。

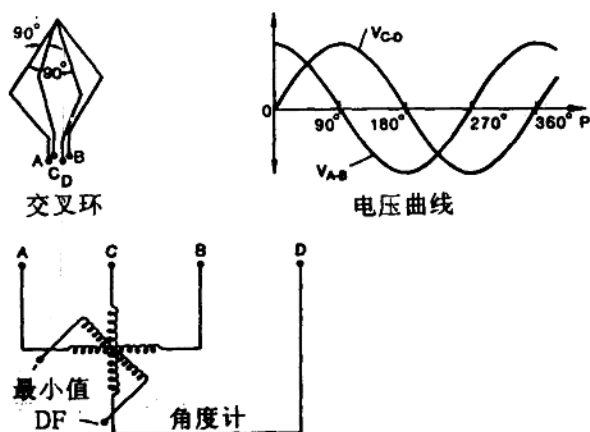


图 22 交叉环天线和角度计

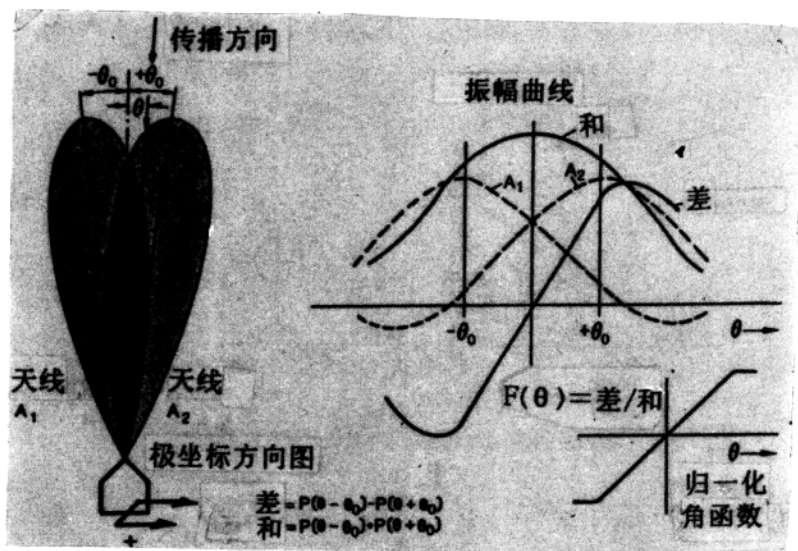


图 23 单脉冲测向法：从信号振幅的和与差中得出示向度。

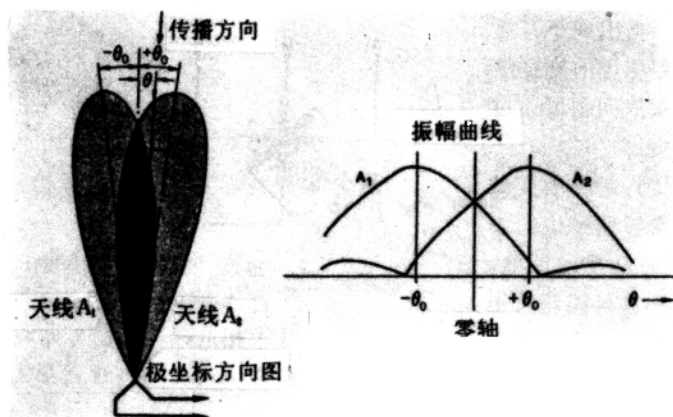


图 24 振幅单脉冲法：利用倍增技术从信号振幅中获得示向度。

单脉冲测向机常用于约 1GHz 以上频率，它采用各种定向天线，最普遍的是喇叭天线和螺旋天线。单脉冲测向机的缺点是：双天线或四天线只能覆盖一个很小的角度（极坐标方向图的交叠范围）。如果不能建立圆天线阵，那么，就必须旋转天线装置朝向主要接收方向。这种系统的优点是：在非常情况下，能对单脉冲取向，同时容易取得数字测向值。另外，经实时测量，方位和仰角误差信号可立即得到，可用于航线修正或卫星跟踪天线。

利用两副天线交叠的极坐标方向图，可以简化单脉冲测向机的设计。这种方法所获得的两个信号可利用一个延迟网络进行分离，然后通过简单的振幅比较技术测定。图 25 为准单脉冲测向法的简图。

3.9 相控阵和圆阵天线

相控阵和圆阵天线也可以用来测向。如图 26 所示，使用这种天线的测向机，其基本特征是具有许多交叠的极坐标方向图。分辨率取决于两个天线波束轴之间的夹角与波束半功率点宽度的比值。通过使用移相器、延迟线、放大器及衰减器，可以用电子学的方法改变极坐标方向图的形状和方向。如图 27 所示，利用放大器和移相器网络，天线阵能产生多重波瓣。由于孔径相加，天线具有增益。

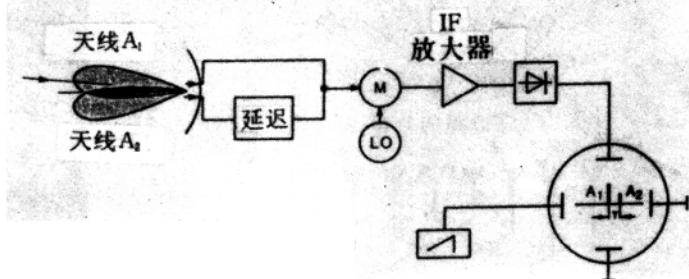
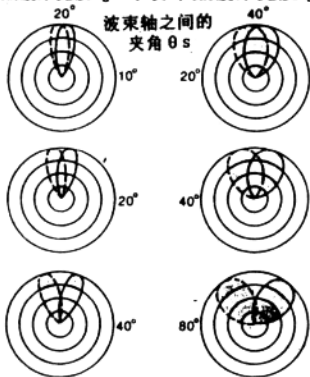


图 25 简单的振幅比较单脉冲测向法（准单脉冲）

半功率点波束宽度 θ_0 半功率点波束宽度 θ_0



不同DF值 θ 的分辨力

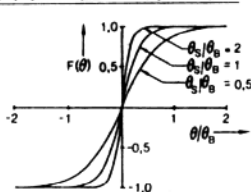


图 26 极坐标方向图的交叠

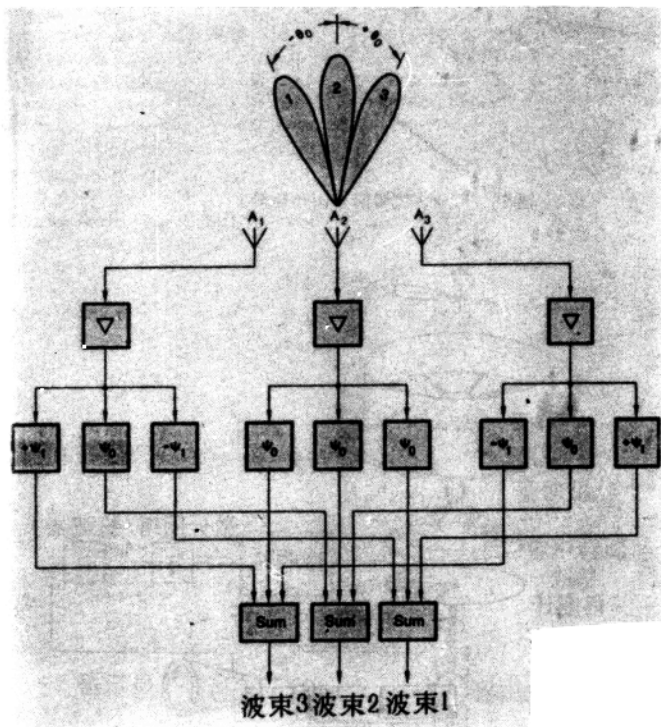


图 27 多波瓣的形成

图 28 给出了包含混合耦合器和固定移相器的巴特勒（Butler）矩阵的一般配置。它用来在单一平面内进行波瓣扫描。所示矩阵形成了相对主接收方向对称的八个波瓣。

图 29 是具有 VHF 和 UHF 圆阵天线的固定测向站。为了达到测向目的，配置在圆周上的天线所形成的每一个相同的波瓣依次与测向值处理器连接，最简单的就是不断旋转的角度计。多重波瓣的电场，在角度计内再现，并由电容探头取样（典型的角速度是 50 转/秒），测向结果显示在 CRT 上。图 30 所示乌兰韦伯（Wullenweber）测向机是熟知的圆阵天线测向机。