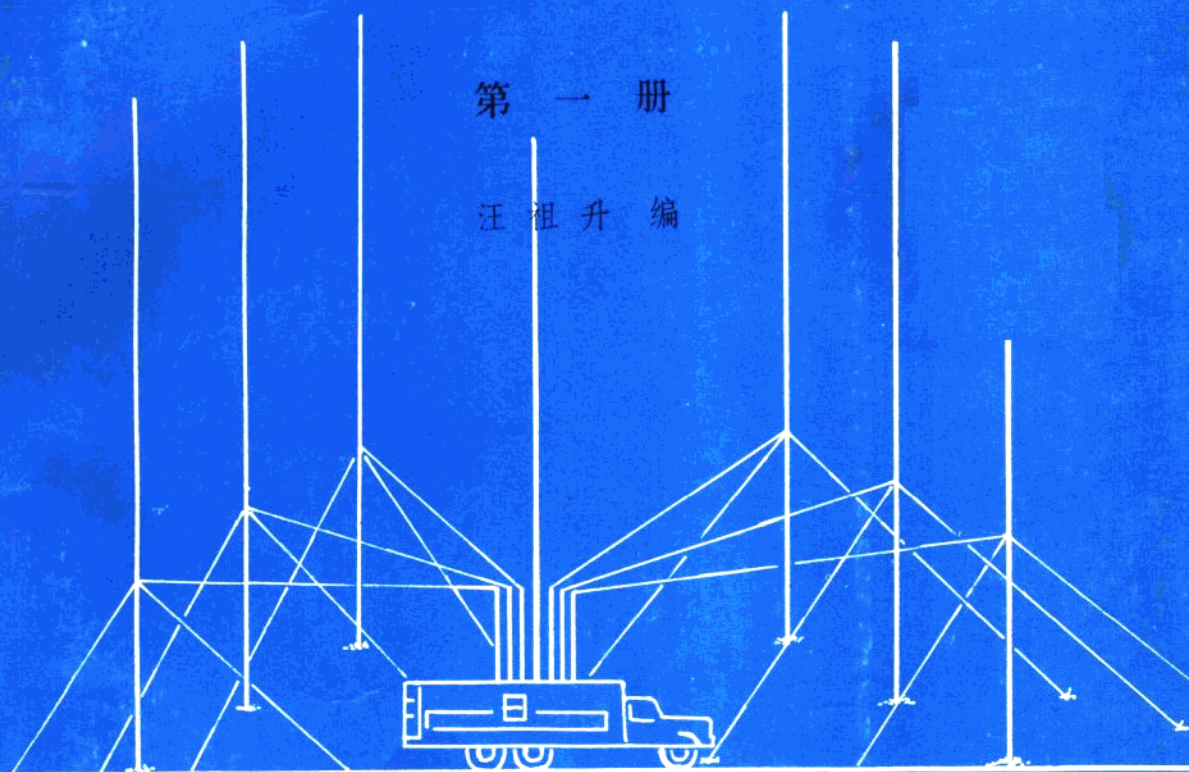


无线电测向

第一册

汪祖升 编



WUXIAN DIANCE XIANG

中国人民解放军信息工程学院

序 言

本书系根据中国人民解放军信息工程学院“无线电测向原理与设备”课程的教学大纲编写的。经我院院长蒋维汉（教授）和部三局高级工程师吴承光同志审稿，认为本书是“一本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、电子对抗专业和计算机通讯等专业的教材或教学参考书，也可供从事这些专业方面工作的科技人员参考。

全书共分十章，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等。

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、计算机通讯等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。本书较详细地介绍了无线电测向的基本理论和方法，包括无线电测向天线、测向机、测向误差分析等基本理论和测向机的调整测试、使用方法等。同时也对电波传播知识作了简要介绍。引入了国内外关于无线电测向技术的一些较新的理论与技术。为了照顾理论上的系统性和使用上的方便，本书对测向新技术专门开辟了一章，介绍近年来较新的测向理论与设备。

目前国外的无线电测向技术，已经发展到采用全自动化无人值守的测向网，集成电路三波道自动无线电测向机、干涉仪时间差测向机和自适应测向机，均采用了微型计算机技术来控制 and 处理示向信息，实现了自动取向和自动定位。且可同时给出被测电波辐射源的方位角和仰角。对于跳频通讯和扩频通讯的测向，已经问世，然而仍是世界各国正在研究的问题。

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。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后，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无线电测向机的工作原理及测向新技术，这两章是测向的中心内容，取材力求全面系统和新颖。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。各章均附有习题和思考题。分两册出版，每册附有参考资料。

本书承蒙蒋维汉院长（教授）、吴承光高级工程师审阅，审阅中提了许多宝贵的修改意见。编者谨致衷心的感谢。

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、通讯工程学院、电子工程学院及国营第九一三厂、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、专家和同志都非常热情地关心和支持了本书的编写工作。吴承光、杜明忠、崔树桐、许春、王崇厚、王子余、陈起、彭孝平等同志，都对本书的编写提了许多宝贵意见和提供许多宝贵资料。杜明忠和陈勇等同志，都热情地支持了本书的出版工作，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，蒋维汉院长亲自参加了本书编写大纲的讨论与审稿，系主任陈景阳（副教授）热情地支持了本书的编写工作，此外，还得到其他许多同志的支持与帮助，编者在此一并致谢。

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，诚恳希望专家与读者批评指正。

编 者

1988年 6 月

目 录

序言	1
第一章 绪论	1
§ 1—1 概述	1
§ 1—2 无线电测向机的主要技术指标	3
§ 1—3 无线电测向系统的基本组成	4
§ 1—4 无线电测向的发展简史	5
习题与思考题	8
第二章 电磁波的一般知识	9
§ 2—1 电磁波的一般特性	9
§ 2—2 电磁波的极化	12
§ 2—3 各波段的电波传播特点	15
2—3—1 长波和超长波传播特点	15
2—3—2 中波传播的特点	16
2—3—3 短波传播的特点	18
2—3—4 超短波传播的特点	22
2—3—5 地面情况对于超短波传播的影响	24
习题和思考题	27
第三章 无线电测向机的天线体系	28
§ 3—1 引言	28
§ 3—2 垂直天线的基本参量和频带扩展	28
§ 3—3 两根间隔天线的测向原理	39
§ 3—4 两对正交分布的间隔天线的测向原理	41
§ 3—5 环状天线	42
3—5—1 小型环状天线的性能分析	43
3—5—2 多匝环状天线的性能分析	47
§ 3—6 屏蔽环状天线	49
§ 3—7 磁性环状天线	53
§ 3—8 间隔双环天线体系	54
3—8—1 间隔双环天线体系的感应电动势和方向性	55
3—8—2 环状天线电流分布不均匀的影响	59
§ 3—9 单向测定天线体系	63
3—9—1 环状天线与开路天线的组合接收	63
3—9—2 间隔双环天线单向测定	67

§ 3—10 角度计测角原理	69
3—10—1 机械旋转角度计的工作原理	69
3—10—2 各种型式的机械旋转角度计	73
3—10—3 电子角度计	78
§ 3—11 n根间隔天线构成的测角系统	80
§ 3—12 由n根间隔天线构成的天线阵	90
3—12—1 直线列天线阵	90
3—12—2 圆天线阵	99
§ 3—13 对数周期天线	110
§ 3—14 超高频测向机的天线体系	115
习题与思考题	117

第四章 测向天线体系的计算 120

§ 4—1 引言	120
§ 4—2 输入回路的噪声系数	121
§ 4—3 电感耦合环状天线效率的计算	126
§ 4—4 小基础垂直天线体系参量的计算	133
§ 4—5 H型天线测角体系的计算	141
§ 4—6 U型天线体系的计算	148
§ 4—7 变量器和平衡器的计算	151
§ 4—8 天线效应及其补偿元件的计算	153
4—8—1 环状天线的天线效应	153
4—8—2 环状天线天线效应的消除方法	157
4—8—3 天线效应补偿元件的计算	163
§ 4—9 定单向电路的计算	165
4—9—1 非调谐垂直天线和调谐环状天线电路的计算	166
4—9—2 非调谐垂直天线和非调谐环状天线电路	169
4—9—3 利用环状天线的天线效应电势简化定单向电路	171
4—9—4 利用角度计场圈接地点电路定单向	171
4—9—5 接入LC回路式定单向电路	172
习题与思考题	173

第五章 测向机原理 177

§ 5—1 引言	177
§ 5—2 测向一般原理	178
§ 5—3 振幅测向法	180
§ 5—4 双波道测向机	184
5—4—1 视觉的选择性	188
5—4—2 双波道测向机正常工作的条件	191
5—4—3 双波道测向机中的振幅平衡和相位平衡	195
5—4—4 测向机中的定单向问题	202
5—4—5 转换波道式双波道无线电测向机	205
5—4—6 部分波道相合的双波道测向机	206
§ 5—5 单波道测向机	207

5—5—1	时间分割制单波道测向机	208
5—5—2	双音频调制单波道无线电测向机	218
5—5—3	交替连接天线与显示器的单波道测向机	220
5—5—4	听觉遥控测向机	221
§ 5—6	旋转角度计测向机	229
§ 5—7	大基础无线电测向机	231
5—7—1	大基础无线电测向机的特点	234
5—7—2	乌兰韦伯尔测向机	237
5—7—3	和差器	243
5—7—4	仰角误差的计算	244
§ 5—8	相位测向法	247
§ 5—9	和差干涉仪体制无线电测向机	254
§ 5—10	自动扇形无线电测向机	261
§ 5—11	多普勒效应自动无线电测向机	263
§ 5—12	多波分析	270
5—12—1	干涉场及其数学分析	270
5—12—2	波的消元法求解	273
5—12—3	多波测向的实例	274
习题与思考题		279

第六章 测向新技术 282

§ 6—1	引言	282
§ 6—2	录音无线电测向机	282
§ 6—3	应用计算机的自动无线电测向机	284
6—3—1	应用微型计算机的快速自动测向机	284
6—3—2	应用计算机的自动无线电测向机	287
§ 6—4	自动无线电测向机	290
§ 6—5	新型三波道视觉测向机	301
§ 6—6	到达时间差 (TDOA) 法测向机	311
§ 6—7	超高频多普勒测向机	322
§ 6—8	高精度VHF/UHF测向新技术	325
§ 6—9	自动遥控测向网	329
§ 6—10	采用自适应零值跟踪器的测向方法	331
习题与思考题		336
参考资料		337

第一章 绪 论

§ 1—1 概述

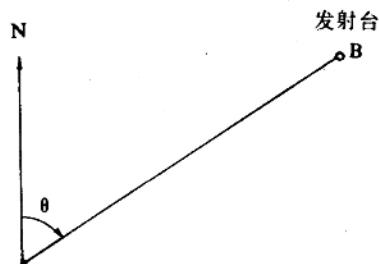
在一个座标系统中要确定某一目标相对于观测点的方向，就必须测量出该目标到观测点的连线与某一个参考方向间的夹角，通常把测量该夹角的过程称为测向。

从物理学的观点来看，测向的方法有许多种。如：声学测向；光学测向；红外线测向；激光测向；无线电测向等等。

无线电测向是建立在电磁波沿最短路径、以光速传播及在无线电收发系统中的天线可以被设计为具有所需要的方向性之基础上。由于无线电波传播损耗小，可以实现远距离测向，它既不受气候条件的影响，又易于做成固定式或移动式测向机，测量固定或移动式目标，而且技术也比较成熟，因此无线电测向已成为当今测向的主要手段。故本书专门讨论无线电测向。

无线电测向就是借助无线电波的传播特性，利用无线电测量设备确定待测无线电辐射源到观测点的连线与某一参考方向之间的夹角的过程。通常规定通过观测点的地球子午线指北的方向（即正北方向）为参考方向。而将用于实现无线电测向的设备称之为无线电测向机。将研究无线电测向的理论与技术问题称为无线电测向学。

在无线电测向技术中，对所测目标测出的方向角通常用示向度这一术语来描述。所谓示向度是指用测向设备测量出来的从观测点的地球子午线指北方向，沿顺时针方向旋转到观测点与被测辐射源的来波方向之间的夹角，记作 θ 。其取值范围为 0° 至 360° 。例如如图 1—1 中，在观测点 A 测量 B 处的发射台的示向度时，则先取过 A 点的地球子午线指北的方向 AN 作为参考方向，再作出从 A 到 B 的连线 AB，则 $\angle NAB$ 即是在 A 点处所测得的 B 处发射台的示向度 θ 。又称为方位角。



A. 测向机

图 1—1 用测向机测量
发射台 B 位置的示向度

示向度和真实方位角是有区别的，真实方位角是在观测点从参考方向旋转至被测电波辐射源客观存在的位置与观测点连线间的夹角。而示向度是由被测电磁波辐射源辐射的电波经过自由空间传播，由测向机测量出来的来波方向所决定的。它包含了由于电波传播和测向设备引入的误差。当其整个与测向有关的过程都不引入误差的条件下，

示向度才等于真实方位角。例如，在单个无线电台的电磁波直线传播，无任何反射电磁波，测向设备也为理想化设备，即完全不产生附加误差的情况下，测向机所测出的示向度与电波辐射源所处的地球大圆弧的真实方位角才能一致。在一般的实际测向条件下，示向度与真实方位角总是不同的，仅电离层的梯度倾斜就很容易使示向度和真实方位角间产生大于 1° 的误差。在多波干涉的情况下，更没有理由认为所测得的示向度等于其真实方位角，因此测向必然有误差，迄今为止，最精密的测向机的测向误差也不小于 $\pm 1^\circ$ 。

当要确定某一个发射台的具体位置时，仅有一个示向度是不可能的。通常有两种方法可以实现定位：

(一)、多台定位法：利用两台以上的无线电测向机同时分别在几个不同的地方对同一被测发射台测出两个以上的示向度，然后在同一张地图上作出各个示向度，根据地球大圆弧进行交叉，近距离时可以用直线交叉定位，远距离时应按地球大圆弧以球面三角计算，交叉定位。这种方法称为交叉定位法，如图 1—2 所示，在 A、B 两点的测向机测量 M 点处的发射机所在位置时，得到示向度分别为 θ_1 、 θ_2 ，则用交叉定位法可以确定出发射机所在 M 点的位置。

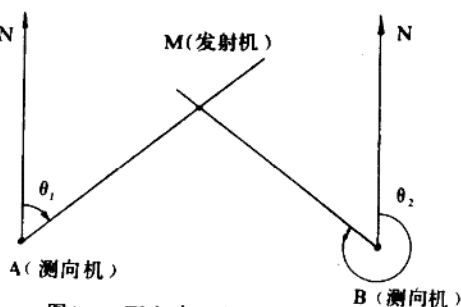


图 1—2 两台交叉定位示意图

(二)、单台定位法：若用同一个测向机同时测量出某被测电台传播来的电磁波的方位角 θ 和仰角 β ，又知产生反射波的电离层的高度，则可实现单台定位。如图 1—3 所示。图中假设测向机位于坐标系的中心 O 点，被测电台位于 xoy 面中的 M 点，ON 为参考方向，A 点为电离层反射点，A' 为 A 点在 XOY 平面中的投影。则根据所测出的 θ 、 β 及已知电离层高度 h ，即可计算出被测发射台 M 的所在方位。

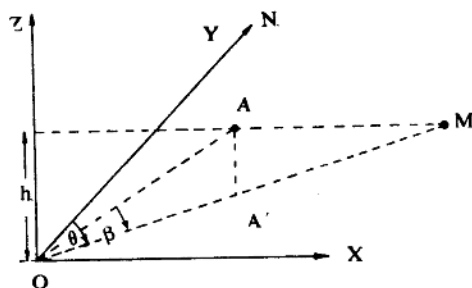


图 1—3 单台定位示意图

无线电测向已广泛用于航海、航空作导航设备。用于导航的无线电测向设备，通过测量陆地上的已知无线电信标（为导航建立的发射台或广播电台）测定船舰或飞机自身的位置，称之为自测法。例如在图 1—4 中，在 A、B 两地安装有无线电信标，M 处有一测向机，取参考方向为 MN，由测向机测出两个无线电信标（即无线电发射台 A 和无线电发射台 B）的示向度 θ_1 、 θ_2 ，则利用已知的 A、B 两地的坐标位置，利用交叉定位法即可确定 M 点的位置。

如果反过来，把无线电信标安装于船舰或飞机上，而在地面上安装两个以上的测向站来测量船舰或飞机所在位置的示向度，并以无线电通讯方式报告给船舰或飞机，用交叉定位法确定船舰或飞机的位置，这种方法称为他测法。例如图 1—2 中，在 A、B 两点测出示向度 θ_1 、 θ_2 来确定 M 点的位置，就是他测法。

上述方法测量飞机的位置，只能给出它在某地方的上空。若要测量它在空间的具体位置，必须要用三维无线电测向机。三维无线电测向机不仅可测量出目标在地面上投影的方位角，而且能测量出地面观测点到目标的仰角。如图 1—5 所示，在地面 A、B 两地各安装一台三维测向机，测量空间目标 M 时，可以测量出方位角 θ_1 、 θ_2 和仰角

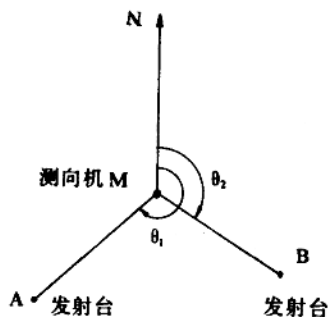


图 1—4 自测法示意图

β_1, β_2 。从而可决定目标M的空间位置。利用这种方法可以测量宇宙飞船、人造地球卫星、航天飞机等空间目标的位置。

无线电测向技术在军事上起着越来越大的作用。它是确定敌人所用无线电台的位置、监测敌人活动的一种重要工具。可以用来测量敌人地面的、水上的、空中的各种固定与移动的无线电台的位置。以便有效地监视和打击敌人。因此，无线电测向早已成为现代战争中的电子对抗的组成部分。使用无线电测向，可截取敌人的情报和引导对敌台的干扰。否则，截取的情报将失去情报的价值，施放的干扰将达不到预期的效果。无线电测向在电子对抗中的主要任务是测定敌方导弹、火箭武器的配置，测出机场、港口的位置，以及使用和配属情况，测定敌方通信电台的方位和配置布置情况等。

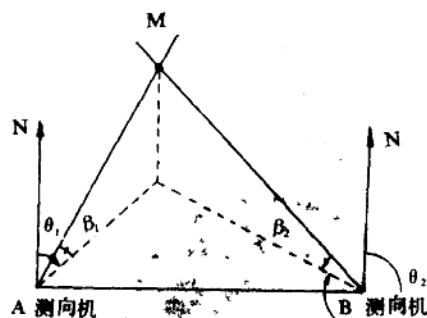


图 1-5 三维测向机测向示意图

无线电测向技术已用于科学研究的许多部门之中。气象研究中，利用它来测量雷雨的位置；在天文学的研究中，利用它来通过测量天体本身的电磁辐射以确定天体的方位；宽孔径测向机已成为研究电离层和电波传播现象的一种重要工具；多波测向机可用于分解电磁场，研究电磁场。近年来，自动无线电测向机已被提出，用于存在干扰的条件下改善接收的信噪比，而且所研究的测向天线体系，亦有益于接收微弱的信号。

§ 1-2 无线电测向机的主要技术指标

鉴别测向机的质量的优劣是通过测向机的技术指标来实现的。虽然对各种用途的测向机的要求不尽相同，但一般都具有如下主要技术指标：

(一) 准确度

测向机的准确度又称测向精度，它是测向机测出的示向度与被测目标的真实方位角之差值。通常测向误差有四种表达方式：即最大误差、平均误差、统计概率误差和均方根误差。

测量测向机误差的方法是在标准测量场地上，每隔10°方位角测量一次示向度，求出每次的误差值，并在真实方位的座标图上画出来，此即是误差曲线。在测向机工作的频率范围内的各个频率上，重复作出这种误差曲线，根据这些曲线图的数据，可以估算出该测向机的误差。

无线电测向机的各种随机误差将在第七章中详细分析。

(二) 灵敏度

测向机的灵敏度，是用来衡量测向机测量远地电台，或小功率电台的弱信号的能力的一个参量。对于不同体制的无线电测向机的灵敏度，有不同的定义，将到第八章去详细介绍，这里仅从一般意义上来介绍测向灵敏度。

我们定义测向机给出满意的示向度时，所需要的入射波的最小电场强度为测向机的灵敏度。所谓满意的示向度，是指示向度的读数准确到不超过允许误差（通常规定该允许误差等于1°）时的示向度。实际上，由于噪声的存在，在小信号时会使示向度模糊，通常认为当示向度的模糊角在正确读数的两侧±5°以内时，读数可准确到误差1°。有时也以阴极射线管显示器上，产生 $\frac{1}{2}$ 正常射线长度的信号作为标准，来确定灵敏度。灵敏度的量纲是 $\mu\text{V}/\text{M}$ ，（或 mV/M ）。

(三) 工作频率范围

测向机的频率范围取决于实际使用的要求。在给定的频率范围内,测向机可以对其中任一频率的信号进行测向,而且各项技术指标均达到要求。作为通讯侦察或电子对抗使用的测向机,其工作频率范围愈宽愈好,同时还要求具有程控自动调谐功能,以便对出现很短的快速信号进行测向。

(四) 测向时效

测向时效是指完成一次测向任务的全过程所需要的最少时间。它包括测向指令传输时间、接收机调谐时间、信号处理时间和测向结果输出显示时间。不同的测向体制,这些时间不同。

由于电磁传播延迟,会使短时间测出的示向度产生较大误差,一般应在较长时间(几秒至数十秒)进行平均,才能得到准确的示向度。因此,有的测向机分别给出单次取向时间和平均取向时间。随着测向技术自动化程度的提高,测向时效也在逐步提高。

(五) 抗干扰性

测向机的抗干扰性是表征存在无线电干扰的情况下,测向机能够对所需信号进行测向,并达到规定的准确度时,可以允许的最大干扰场强。

测向机的抗干扰性是决定测向机在实用中能否测向的重要指标。随着测向体制的不同,抗干扰性差别很大,有的测向机在没有干扰的情况下准确度很高,由于抗干扰性差,在实际工作中,效果很差,甚至不能使用。一般来说,大基础天线阵比小基础天线阵的抗干扰性好,双信道(或多信道)机比单信道机的抗干扰性好。

关于这个问题将在§ 8—6中详细分析。

除此之外,还有作用距离、可靠性、经济性、体积、重量、电源等指标要求。

这些指标随测向机的用途的不同,对其要求也不同。例如,对于固定的测向台来说,测向设备的体积、重量就不必苛求,但是希望能够遥控操作;而对于移动测向台来说,则对体积和重量有较高的要求。又如,测量快速短信号,测向时效性的要求就特别重要。

§ 1—3 无线电测向系统的基本组成

无线电测向机的种类很多,其构成形式也千差万别。然而对绝大多数测向机来说,可概括如图1—6所示的方框图⁽¹⁾,其各单元的部件和作用分述如下:

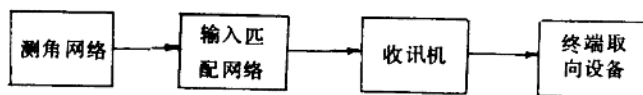


图1—6 无线电测向系统的基本构成方框图

(一) 测角网络

该网络包括旋转天线体系,或固定天线体系与角度计等。其作用是接收被测辐射源的来波,同时以旋转天线体系的方向性或以固定天线与旋转角度计组合,形成方向性接收,从而产生与示向度有关的电动势,以供收讯机和终端取向设备处理。

(二) 输入匹配网络

该网络包括阻抗变换器、变量器、传输线、天线共用器或接力放大器等部件。其作用是

完成对含有方位信息的载波进行不失真的传输,以保证接收机输入端能得到正确的输入信号幅度。

(三) 收讯机

该收讯机可以是单波道接收机,也可以是双波道接收机,或者是三波道接收机,它们可以是手工调谐方式,亦可以是自动调谐方式。依实际需要而定。收讯机的作用是选择所需讯号并将含有方位信息的信号进行载频变换,放大、解调等处理,根据终端取向设备的要求,可以从收讯机的中频输出,或者从其检波输出。

(四) 终端取向设备

该设备的显示方式可以是指针式方位指示器和耳机(或扬声器),也可以是极射线管制作的显示器,或者是数码显示器等。也可能是数字取向器或电子计算机,其作用主要是提取、处理方位信息,输出示向度,从而完成对所测目标的示向度的显示。

§ 1—4 无线电测向的发展简史

早在无线电测向机问世之前,由于研究无线电定向通讯的需要,已经开始研究定向天线的问题了。例如,在1893年之前,赫兹在他的早期实验中,在200 MHz的频率上就曾利用金属柱面抛物线镜来集中发射机的能量,定向发射信号。1899年,Braun发明环形测向机。1900年,高频通讯中,泽里克(J-Zenneck)引入了一种简单的控制器——导线型反射器。^[4]

1902年,斯托恩(J-Stone)为了确定电波传来方向,提出了旋转的天线阵,为后来的Adcock天线奠定了基础,亦可认为这种天线体系是早期的Adcock天线。

在1905至1906年期间,马可尼架设了一个由多根长水平天线(具有短的垂直部分)构成的天线阵用于定向接收,但当时对其物理原因不甚清楚,后来霍依斯克尔曼(H-Hoerschelmann)证明了地面导电性使电场倾斜,天线的水平部分和垂直部分的组合接收,增加了来波方向上的增益。马可尼还使用了圆天线阵,采用依次使用每一根天线的接收信号,实现了对所接收信号的定向。同期罗恩德(H-J-Round)在纽约用骨架天线来提高接收的方向性。

1907年,贝里尼(E-Bellini)和托斯依(A-Tosi)共同设计出一对正交环状天线与角度计构成一个固定天线的测角系统,称之为BT系统(Bellini-Tosi System)。该系统要求所用的两个正交环状天线大小相同,电气构造完全一致,对天线体系中心完全对称。同一时期,泽里克应用全向振子置于上述天线体系中心,并将其接收电势同相加到BT系统的角度计线圈的输出端,获得心脏形方向性,消除了测向中180°的不确定性,实现了定单向。

1908年德国制造和使用了一种无线电测向仪,称之为无线电罗盘^[5]。这时的测向是借助于环状天线等方向性天线与接收设备等组成的测向设备来测量广播电台等的方向。

第一次世界大战(1914—1918年)期间^[6],无线电测向技术获得了迅速的发展,具体表现在电子对抗中,此期间,德、美、英等国都将无线电测向设备用于舰艇上,例如;1914年德国巡洋舰“格义班号”和“布端斯劳”在地中海受到英舰“古劳斯塔号”的跟踪,英舰企图用无线电通讯报告德舰的活动情况,但德舰使用无线电干扰,破坏了英舰与基地的联络,使英舰无法报告,结果两艘德舰顺利地逃到土耳其,此期间英国也干扰德国,在有效地实现这些干扰中,无线电测向起到导向作用。

1918年Adcock发明了Adcock无线电测向机,它使极化误差获得了很大的改善。1924年,Watson—Watt发明了双波道视觉无线电测向机。1926年,史密斯—罗斯等发表了从理论上分析极化误差的文章,同年出现第一个无线电信标,供导航使用。随之美国制出四航道系

统的地面导航台,并开放使用。到1930年期间,Adcock测向机引起了广泛的研究。三十年代,全向和定向信标获得了广泛的应用,欧美共建无线电信标约1300个。这一时期,弗兰克林、依斯克斯里和维格恩特各自独立研究出间隔双环天线体系。在这一时期,各国的无线电测向均是小基础天线体系的测向机,其天线体系有单环天线、间隔双环天线体系和阿德柯克天线体系,其方位角以指针式仪表、听觉小音点测向法取向。

第二次世界大战期间,无线电测向技术迅速发展,各种天线体系的测向机相继问世,如交叉环天线体系、Adcock天线体系(包括U型和H型天线体系)、扇形扫描天线体系等都用于测向。瓦特型双波道测向机、相位比较型测向机、透镜型测向机等都发展起来。1940至1947年间,Godfrey, Cowle, Buddenboom, Earp发明了多普勒测向机。其间美军用多普勒测向机对抗设备就达7000多部。而且在抗干扰方面有新的发展,如,1947年史密斯和罗斯设计出地网,用以克服场地导电性不良对测向的影响。同时,英国克伦普顿(Crampton)将两套或多套Adcock天线组成测向群;叶普(Earp)和哥德佛日依(Godfrey)提出从圆天线阵中依次逐个对天线取出信号的相位差,以提取方位信息等。

第二次世界大战以后,世界各国的无线电测向事业都得到巨大的发展,出现了许多新型的测向机^{[7][8][9]},无线电测向理论日趋完善,无线电测向已成为一门独立的学科。

五十年代,除了使原有无线电测向设备更加完善和提高之外,新型、性能更好的测向设备不断涌现。例如:1954年韦特(Whate)利用圆天线阵制出了多普勒测向机;1956年德国的耳恩德弗里斯克(Rindfleisek)制出了乌兰韦伯尔(Wullenweber)测向机,准确度可达优于0.1°。1957年西德制造出第一部瓦特逊—瓦特原理的三波道测向机。1958年,西德R/S公司研制出采用电子或旋转天线的VHF大基础多普勒测向机。与此同时,苏、美、日等国家与此类似的测向机也相继问世。旋转角度计型测向机也已问世。而测向显示设备采用了阴极射线管显示示向图象。六十年代出现了轴角编码显示器、开关转换型单波道测向机、时间分割式单波道测向机、双音频调制型单波道测向机,及干涉仪体制双波道测向机等新型测向设备。各国均很重视测向理论研究^[10]。例如:美国海敦(Hagden)1961年架设了直径为290米的由120根单元天线构成的圆天线阵供理论研究使用,英国曾研究多波测向理论和技术等等。

七十年代以来,在一些发达国家,如西德、美、英、日、苏等国都相继研制出一些新型测向机,例如:三信道干涉仪体制测向机、到达时间差型测向机、瓦特逊——瓦特三信道测向机、补偿型多普勒双信道测向机及多波测向机等,而且普遍都用微机控制、数据取向等新技术。从工作频带上看,已由中、短波发展到超短波范围。而且已研制出一些覆盖短波、超短波的宽频带测向机。同时,出现了以对数周期天线为单元振子的圆天线阵。例如美国研制的M410型单台定位测向系统中,天线系统是由数十个对数周期天线作基本单元的垂直、水平双重极化天线组成的圆天线阵,可以覆盖0.5—30 MHz,实现了在15:1的宽频带上天线波束宽度变化仅3:1,利用计算机处理测向结果,可给出方位角、仰角,在已知反射电波的电离层高度时,可单台定位。日本用36对单元对数周期天线,用300米孔径构成圆天线阵,供侦测合一使用^[11]。

八十年代以来,在单台定位技术方面,又有了新的发展,例如美国的Z-7000型测向机可以用高达0.4~3(RMS)的测向精度实现单台定位。同时干涉仪体制、多普勒双通道、旋转角度计式超高频测向机都相继问世,还出现无人值守的全自动测向站。

微机和电子计算机用于测向的控制和数据处理,不但大大提高了测向准确度,而且大大提高了测向时效性。例如日本的D2690型测向机、单次取向时间为0.15毫秒。表1—1中给

出了近年来西方各国的几种典型超短波测向机的主要性能参数。

总之，从第二次世界大战以来，无线电测向从理论到设备，都已发展到相当成熟的程度，表现出具有如下特点：

1、从测向体制上看，采用单波道、双波道、三波道的各种体制的测向机均已问世，如：瓦特逊——瓦特型、旋转角度计型、多普勒型、干涉仪型及到达时间差型等各种体制的测向机，随着电子器件和电子计算机技术的发展，都经历了由电子管到晶体管到集成电路的各个阶段。

2、从测向机工作频带上看，宽频带测向技术的发展，实现了短波、超短波测向一体化。

3、从技术性能上看，由于计算机的使用，不仅使测向性能大大提高，而且使测向操作智能化。出现了全自动化无线电测向网和无人值守测向站

4、从结构上看，在一些发达国家，测向设备基本上实现了集成化电路，积木化结构。

5、从测向的天线体系上看，用交叉双环、垂直振子、阿德柯克型、对数周期天线等作单元天线构成小、中、大基础天线体系，而且使用了有源天线

6、从测向网的构成方式上看，有固定式、车载机载、舰载、移动式、和便携式等。

7、从对多波束干涉场的分析及其方位角的计算方面来看，出现了超级解法的研究。如最大似然法、自适应角度响应法、热噪声算法、最大熵法、特征分析法等。

可以预言，在今后一段时间内，无线电测向技术必将进一步向智能化、全自动化方向发展，尤其是对突发通信和跳频通信的测向，对多波束干涉场测向的研究，将是各国测向技术的研究重点。

解放前，我国的电子工业几乎是一个空白。解放后，我国的无线电测向事业也随着电子工业的发展而建立起来，并且在保卫祖国、巩固国防和科学研究中起着越来越大的作用。为了赶超世界先进水平，今后还应尽量采用新技术，新成就来提高我国的测向设备的技术性能，简化使用操作，减小体积、重量、降低成本，研制出各种类型的测向设备，以满足我国社会主义事业的需要。

附表1—1国外几种超短波测向机性能比较表

型 号	NP12 (西德 R S)	SFP218 (西德西门子)	PA 005 (西德 R S)	200 加 拿 大	RTA 1471 (英 RACAL)
频率范围 (MHz)	80—1300	20—418	20—1000	10 KHz— 572 MHz	20—1000
测向体制	旋转对数周期天线	三 波 道	多 普 勒	三 波 道	多 普 勒
系统误差	<5°	±1°	±1	+1	2
灵 敏 度	1—2μV/M	0.5—8μV/M S/N=6DB		VHF段: 8—10μV/M S/N=10DB	2μV/M
平均取向 时 间					三次一秒
单次取向 时 间	1秒	接收机频率步进 时间1ms	0.1秒	接收机频率步进 时间2μS	每秒50个 方位角
方 位 角 显示方法	CRT	CRT轴角编 码 器	三位数字LED 每5一个	CRT及电子数字 显示器	CRT显示 座标并有数字
天线结构	垂直水平 H1M	3付H ADCOCK	20—200MHz 32振子φ25M	环及H ADCOCK	三套四单 元天线阵
尺 寸	双LPDWM	最大间距2.5M	200—1000MHz 16振子φ1M	装 车	电子转换
遥 控	50 M		最大300M	数字遥控	

附表1—1(续)

WJ8971A (美WJ公司)	DFS15 (美ESL公司)	D4560 (日本光电)	D2690 (日本光电)	TELEGON7 (西德德律风根公司)	Z-7000 (美ZET公司)
20—1000	20—500	30—300	300—1000	20—500	1—1000
多普勒	干涉仪	多普勒 双通道	旋转多普勒	电子角度计 旋转130Hz	到达时间差 (TDOA)
3° (RMS)	1—2°	2° (RMS)	<10°	±3°	0.4—3° (RMS)
	1μV/M	4—15μV/M	10μV/M	3.7—7μV/M	0.4—1.5μV/M
0.5、1、2秒		0.5、1、3秒		0.26、0.8秒	
	200mS	7.7mS	0.15mS	0.3S	150mS
三位数字 LED3° 一个	三位数字	CRT 三位数字	CRT 及数字显示	三位数字 LED11° 一个	数字方位角测向质 量交叉台位LED
		二套天线孔 径4M、3M各 16单元	LPD尺寸 550×650mm 垂直水平各G=6DB	有源ADCOCK 24+8振子 φ1.5M、高0.2M	多种天线均可
可以遥控	便携式				

习 题 与 思 考 题

1. 何谓无线电测向？它与其它方法测向比较有何优点？
2. 何谓示向度？根据示向度确定无线电发射台方位的依据是什么？
3. 何谓交叉定位法？自测法与他测法有何区别？
4. 无线电测向有何作用？
5. 对无线电测向机有哪些主要要求？
6. 最简单的无线电测向系统由哪些基本单元所组成？各单元的作用是什么？
7. 试述无线电测向技术的发展简史。
8. 现代无线电测向具有哪些特点？

第二章 电磁波的一般知识

我们知道,无线电测向是依靠测量空间电磁波的到达方向完成的。对所测的发射台的方向判断是否准确,除了要求无线电测向设备具有良好的性能之外,还依靠人们对于电磁波传播规律的认识,因此电磁波传播的特性,电磁波的各种极化,及多波传播和接收等知识,必然成为测向课程的内容之一。所以我们这里将叙述一些电磁波的知识。鉴于我们在电波与天线课程中已学过有关电波传播的内容,因此本章所引用的材料是纲要性的,它将为学习无线电测向奠定电磁波传播的理论基础。

§ 2—1 电磁波的一般特性

在一个电磁波辐射体的周围,必然存在着交变的电场和磁场,早已证明,在该空间任意一点的电磁场应满足马克斯威尔方程。即:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{i} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

此外,还有三个与媒质特性有关的公式:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{i} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.7)$$

其中, $\mathbf{H}$ 为磁场强度, $\mathbf{B}$ 为磁感应强度, $\mathbf{D}$ 为电位移矢量, $\mathbf{E}$ 为电场强度, ρ 为体电荷密度, $\mathbf{i}$ 为电流密度, ϵ 为介电常数, μ 为导磁系数, σ 为导电率。

马克斯威尔方程揭示了交变的电场必然在其周围产生交变的磁场,而交变的磁场又在其周围产生交变的电场。这就造成电磁场在空间的传播。我们把这种交变的电磁场在媒质中的传播称为电磁波。最广泛使用的是自由空间的电磁波。我们称这两个相互联系的电场与磁场的总和为电磁场。电磁场是一种特殊的物质。

通过求解马克斯威尔方程组,可以得到如下方程:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

这是波动方程,这亦从理论上证明了,电磁场这个特殊的物质是以波动的形式存在的。即是电磁波。

众所周知,一个电流为 I , 长度为 l 的基本振子所产生的电磁场,在离振子较近的距离

内(小于一个波长),主要呈静电场和电磁感应场。已经证明:静电场的场强与振子的距离的立方成反比;而电磁感应的场强与距离振子的距离的平方成反比,在此区域内的辐射场是相当小的。

随着离振子的距离的增加,感应场很快地衰减,到大于二、三个波长的距离上,实际上只存在辐射场,辐射场在自由空间中的场强与离振子的距离成反比。

在直接邻近振子的感应区域内,电场强度与磁场强度之间存在着接近90°的相位差,随着远离振子,相位差减小,到辐射场区域时,若在介质(空气)中传播,电场与磁场的相位一致。

对于无线电测向来说,当测定远距离的发射台时,我们感兴趣的是辐射场;而当研究测向天线体系附近的导电(或半导体)物体对测向的影响时,我们又对近区场发生兴趣。

下面我们从测向的实际要求出发,着重讨论远区场。假设有一辐射振子,长度为 l ,其上有射频电流 I ,当距离辐射振子的距离 $r > \frac{\lambda}{2\pi}$ 时,其电场强度和磁场强度分别为:

$$E_{\theta} = j \frac{I \omega \mu}{4\pi r} \sin\theta e^{j(\omega t - K \cdot r)} \quad (2.10)$$

$$H_{\phi} = j \frac{I \omega}{4\pi r} \sqrt{\epsilon \mu} \sin\theta e^{j(\omega t - K \cdot r)} \quad (2.11)$$

$$E_r = E_{\phi} = H_r = H_{\theta} \approx 0 \quad (2.12)$$

参阅图2-1, E_{θ} 的方向是子午面上经过P点圆弧APB的切线方向, H_{ϕ} 的方向是赤道面上经过P点圆弧CPD的切线方向。 r 是辐射振子到观测点P的距离。

$K_c = \frac{2\pi}{\lambda}$ 是波数,又称相移常数。它表示电磁波移动单位长度所产生的相移。 λ 为工作波长。

从式(2.10)和(2.11)得媒质的波阻抗 Z :

$$Z = \frac{E_{\theta}}{H_{\phi}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (\Omega) \quad (2.13)$$

在真空中, $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨利/米, $\epsilon = \epsilon_0 = 8.9 \times 10^{-12}$ 法拉/米。

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi = 377 \quad (\Omega) \quad (2.14)$$

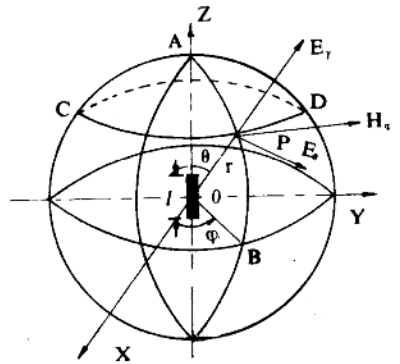


图2-1 基本振子辐射场坐标系

电磁波向前传播的过程,可以看成是电磁波的等相位面沿传播方向前进,而等相位面即是电场强度或磁场强度相位相同的点构成的面,又称波阵面或波前。

由式(2.10) — (2.12)可见,远区场的电磁波是一个球面波,即波阵面为一球面。但是在距离辐射振子很远的球面上的一个不大的区域内,可以近似看作平面波,即波阵面被看作平面。若在平面波的波阵面上,各点的电场强度大小相等,方向相同,则称此波为均匀平面波。由上述可见,在自由空间的均匀平面波具有如下的特性:

(一) 在空间任意一点上,电场强度 E 和磁场强度 H 的方向相互正交。

(二) 在真空中有 $\sqrt{\epsilon_0}E = \sqrt{\mu_0}H$ 。其中 E 和 H 是空间某一点上的电场强度和磁场强度矢量的瞬时值。根据波的概念,由该式可见:

(1) 空间任何一点电场强度 E 和磁场强度 H ，在任何一个时刻都保持同频率、同相位。

(2) 空间任何一点的电场强度 E 的幅值与其磁场强度的幅值成正比。

(三) 由式 (2.13) 可见，空间任意一点电场强度与磁场强度之比是一个常数，称其为媒质波阻抗。在真空中的自由波阻抗近似为 377Ω 。

(四) 对于远区场来说，空间任意一点的电场强度、磁场强度的大小与该点到辐射源的距离成反比。

(五) 当辐射的频率及辐射振子电流大小一定时，若电磁波在任意媒质中传播，电场强度与媒质的阻抗成正比，而磁场强度与媒质的波阻抗成反比。

(六) 当辐射振子的电流不变时，若 $l < \frac{\lambda}{2}$ 时，电磁场强度与 $\frac{l}{\lambda}$ 成正比，若偶极子长度 l 不变时，波长越短，（频率越高），电场强度越强。

(七) 由乌莫夫—坡印廷矢量关系来考察电磁能量的传播。

$$P = E \times H$$

在自由空间，平面电磁波的 E 和 H 互相垂直，则

$$P = EH = E_x H_y = Z H_y^2 = \frac{E_x^2}{Z} \quad (2.15)$$

其中 $Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ ——自由空间的波阻抗

该式说明，对于均匀平面波来说，能量是沿着同时垂直于电场与磁场的方向传播的，对于沿 Z 轴传播的电磁波来说，其能量亦沿 Z 轴流动，且其平均功率流密度为一实数。如图 2-2。

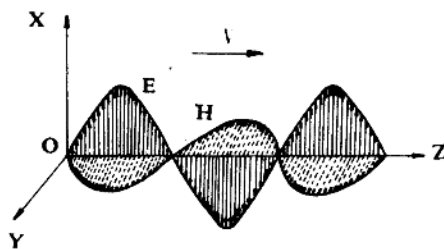


图2-2 电磁波的传播示意图

电波在空间传播的相速 $v = \frac{\omega}{K_c} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$ 。对于自由空间来说， $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = 3 \times 10^8$ 米/秒。式

中 ω 为电波的角频率。 K_c 为波数，又称相移常数。

(八) 在导电媒质中传播的平面电磁波，由于媒质中的传导电流的损耗，使电波被衰减，其电场和磁场均按 $e^{-\alpha_c z}$ 的规律衰减。 α_c 为衰减常数。它表示电（或磁）场的幅度以 $e^{-\alpha_c z}$ 的倍率随 z 增加而减小。

$$\alpha_c = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\mu\epsilon} \right)^2} - 1 \right]} \quad (2.16)$$