

内部发行

小基础无线电测向

SMALL-APERTURE
RADIO DIRECTION-FINDING

陈慧琴翻译
吴承光审校

·

国家无线电监测中心

57323部队科技情报科

前言

小基础无线电测向始于二十世纪初,此后,这个学科一直在不断发展。时至今日,小基础测向正在无源无线电定位和无线电导航的诸多领域中起着重要作用。各类相关技术业已形成,且已开发了许多工作系统以满足各式各样的技术工作要求。它正被广泛地应用于诸如军事、准军事、政府、公共事业、商业和民用事业中。

本书的主要目的是叙述小基础无线电测向的特征和特性,为解决系统问题提供统一的途径。重点是叙述基本工作原理和基本性能。主要意图是确认产生误差的机理、定量的确定参数并提供减小误差的方法。为增进其效用,本书还包括了有关辅助系统研究、测试和校准、测向组网和通过无线电测向进行无源地理定位等资料。

本书会引起各类读者的兴趣。它可以作为测向专业初学者的入门教科书,也可以作为经验丰富的测向专家的技术参考书。从事测向研究、设计和开发的工程人员以及负责部署使用的人员会感到此书的价值。从事于用小基础测向系统集成成为较大系统的系统工程师会发现此书很有用。同样,小基础测向机的使用者和操作人员也会从中受益。

分析结果是以方便于工程使用的形式来示的。需要具有一定的数学计算知识。为了简洁明了,书中省去了严密的数学论述,但提供了充分的数学说明来佐证分析结果。有的地方还列出了包含详细数学论述的参考书目。

第一章介绍无线电测向的诸要素并以直线波长为基准说明了小基础测向定义,还讨论了它的历史和发展。第二章从总体上介绍无线电测向的基本工作原理,并着重介绍了小基础测向的原理以及使用幅度、相位和时间测量信号到达方向的技术。第三章论述了在频率、空间和时间域中的技术和工作性能因数。第四章叙述各种到达方向误差源,包括传播引起的误差,环境、仪器和观测误差,特别强调了它们对小基础测向性能的影响。第五章中,根据获取到达方向信息的方法对小基础测向技术进行了分类,对各种技术作了分析,对操作方法做了定量分析,还介绍了其优越性。第六章代来性地列举了一些当代正在使用的小基础测向系统。第七章研究的是无源地理定位技术,包括测向归航、导航和三角测量。第八章叙述了对性能起重大影响的辅助系统的特性和设计方法。第九章中讨论了测向校准和测试。第十章分析了跳频、扩频传输的测向。附录介绍了适用于小基础测向分析的矩法计算机程序。

目 录

前言

第一章 绪言	001
1.1 定义	001
1.2 历史与发展	002
1.3 现代应用领域	004
第二章 工作原理	006
2.1 测向基本原理	006
2.2 小基础测向原理	007
2.2.1 绪言	007
2.2.2 幅度响应	007
2.2.3 相位延迟	010
2.2.4 时间延迟	012
第三章 性能的确 定	013
3.1 性能分类	013
3.2 主要参数	013
3.2.1 频率域	013
3.2.2 信号域	014
3.2.3 空间域	014
3.2.4 时间域	015
第四章 测向误差源	016
4.1 绪言	016
4.2 传播引起的误差	016
4.2.1 传播机理	016
4.2.2 到达方向误差	022
4.2.3 天波到达方向误差	028
4.3 环境误差	032
4.3.1 极近区	032
4.3.2 近区	033
4.3.3 远区	033
4.4 仪器误差	034
4.5 观测误差	037

第五章 系统级叙述	040
5.1 功能分类.....	040
5.2 第Ⅰ类:幅度响应	040
5.2.1 类别.....	040
5.2.2 一单元天线单信道接收机.....	042
5.2.3 二单元天线单信道接收机.....	045
5.2.4 二单元天线双信道接收机.....	048
5.2.5 仪器和观测误差.....	049
5.3 第Ⅱ类:相位差--幅度响应	057
5.3.1 功能探讨.....	057
5.3.2 分类.....	059
5.3.3 单基线天线单信道接收机.....	060
5.3.4 双基线天线单信道接收机.....	064
5.3.5 单双基线天线双信道接收机.....	068
5.3.6 双基线方向天线三信道接收机(爱德考克--沃森--沃特).....	073
5.3.7 仪器与观测误差.....	075
5.4 第Ⅲ类:相位比较	078
5.4.1 功能实现途径.....	078
5.4.2 分类.....	080
5.4.3 相位干涉仪:二个天线单元和双信道接收机	082
5.4.4 相位干涉仪:三个天线单元和双信道接收机	086
5.4.5 相位干涉仪:四个天线单元和双信道接收机	087
5.4.6 相位干涉仪:三个天线单元和三信道接收机	089
5.4.7 准多普勒仪.....	091
5.4.8 仪器与观测误差.....	094
5.5 第Ⅳ类:到达时间差	097
第六章 典型实用的小基础测向系统	104
6.1 幅度测向系统.....	104
6.1.1 航空MF和HF自动测向系统.....	104
6.1.2 航海MF和HF无线电测向--自动测向系统.....	107
6.2 相位差--幅度测向系统.....	109
6.2.1 航海、政府、公共服务VHF测向系统	109
6.2.2 应急和遇险VHF	111
6.2.3 战术情报搜集系统.....	112
6.3 相位测向系统.....	114
6.3.1 干涉仪.....	114
6.3.2 准多普勒.....	119

第七章 无源地理定位	121
7.1 基本技术	121
7.2 辐射源归航	121
7.3 导航	122
7.4 反向交会三角测量	122
7.5 水平(方位)三角测量	123
7.5.1 分析技术	123
7.5.2 误差描述符	129
7.5.3 测向场址考虑	131
7.6 垂直三角测量	131
7.6.1 单台定位	131
7.6.2 飞机方位/仰角定位	133
7.7 测向网	133
第八章 子系统需要考虑的问题	136
8.1 天线	136
8.1.1 电子天线	136
8.1.2 宽带天线	136
8.1.3 有源天线	136
8.1.4 测向基线扩展	138
8.2 接收机	138
8.2.1 共同的接收机设计考虑	138
8.2.2 特殊设计考虑	139
8.3 测向处理器	141
8.4 显示和控制	142
第九章 测向系统的统准与测试	145
9.1 方法	145
9.2 工作台测试	145
9.3 屏蔽室和无反射室测试和校准	146
9.4 标准室外场地测试	146
9.5 安装架设测试和校准	149
9.6 工作测试和校准	149
第十章 扩频测向	151
附录 矩法计算机程序	154

第一章 绪言

1.1 定义

无线电测向就是使用无线电测向机(RDF)来确定无线电发射源方向的一种方向测定。无线电测向机是无源装置,它能确定射频能量到达方向(DOA)。它是一个接收系统,它的工作是从过往的电磁无线电波中截取能量,从而获得到达方向信息的。[1]

一台无线电测向机包括四个重要的功能部分(见图1.1)。天线用来截取电磁能量并把它转换成含有到达方向信息的信号。接收机转换、放大并处理信号成为中频或基带信号。后置接收处理器进一步处理信号以获取到达角(AOA)原始信息。测向信息处理读出显示单元,把到达角基本数据传输给测向信息用户。

天线在无线电测向机中是一个关键性的辅助系统。它从入射电磁场截取能量,提供含有入射能量到达角信息的输出信号。无线电测向机是依据天线方向性来分类的。方向性是天线在空间域中选择接收能量之能力的度量。最常用的度量单位是半功率波束宽,它与天线的直线孔径相关(直线孔径定义为天线的最大直线尺寸)。

图1.2表示了半功率波束宽与直线孔径(以波长计)的关系,划出了小孔径、中孔径和大孔径无线电测向三个范围。范围间的界线不严格。有时候把“小孔径”说成“窄孔径”;把“大孔径”说成“宽孔径”。没有一定的标准,但通常使用“大、小孔径”无线电测向。图1.2还表示了以直线波长分类的几种代表性的测向天线类型。

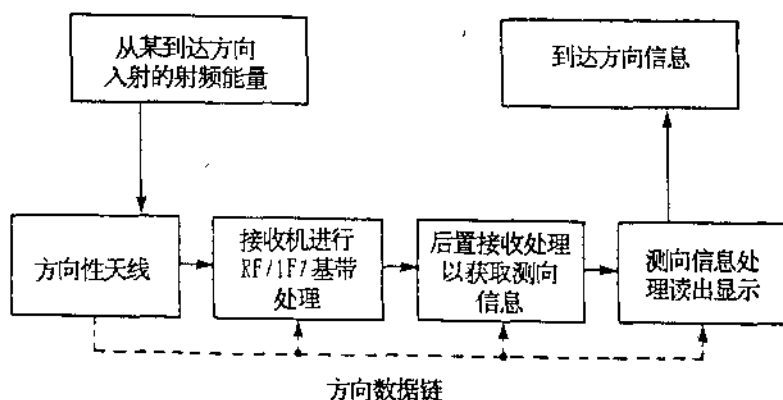
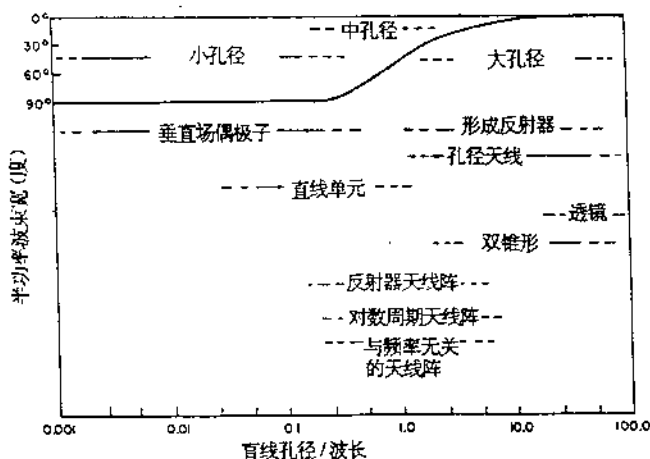


图1.1 测向过程中的几个功能单元

小孔径和中孔径范围之间没有明确的划定。有些测向专业人员认为小孔径指直线孔径只有零点几波长,而另一些人则认为半波长孔径以内的都为小孔径。本书采用后一种标准,因为当前的趋势是在宽带宽、小基础测向中,在最高工作频率使用半波长左右的孔径。



1.2 波束宽与直线孔径/波长关系图
(附测向孔径范围和代表性的天线类型)

小基础测向的最佳设计涉及到一套独特的设计思路和参数折衷方案。使用小孔径会使天线有效区降低, 线路幅度相位不平衡, 天线单元互耦合和散射、入射信号去极化和多径所造成的不利影响更加剧。显然最好是使用中孔径或大孔径。然而, 所需的工作范围、有限的物理空间、站的选点要求等很可能必须使用小基础测向机。现在其它的一些工作要求(如避免目视可见和雷达探测所要求的隐蔽性)更强调了小基础测向机的使用。

1.2 历史和发展

小基础无线电测向是一门不断发展的学科, 它最初始于二十世纪初叶, 是赫兹、马可尼和詹尼克等人研究定向天线的工作成果[3]。1899年, 布朗旋转一对间隔半波长而又相互连接的垂直天线以获取定向辐射[4]。1902年, 斯通提出[3]旋转布朗[4]设计的天线阵以获取到达方向信息。1906年马可尼对离海岸16英里的“富里安斯”舰上发出的信号进行测向实验。马可尼使用的是约 $1/5$ 波长水平天线的辐射系统, 悬于地面附近。布朗和马可尼的实验可以说是最早系统使用无线电测向技术。

到1907年, 当皮卡特和德福雷斯特对环形天线集中研究后[4], 垂直环状测向天线的优越性才被人们所承认。皮卡特进行了环状天线测向的现场试验, 这些试验使垂直环状天线被确认为最主要的测向天线。

1903年, 贝立尼和托西发明了无线电测角器[3, 4], 并把它与两个交叉环一起使用, 这样就成了第一台机电扫描小基础测向机。

环状天线测向机经一段使用后很快暴露出弱点: 当有水平极化的电离层传播信号时, 其误差很大。1918年出现了阿德考克天线, 虽然, 是斯通发表过阿德考克原始思路[3]。阿德考克天线由反相而接的两个垂直天线(偶极或单极)组成, 它大大减小了水平极化天波信号所造成的误差。

第一次世界大战期间发明了真空管接收机, 它的使用大大改善了无线电测向机的性能。

到1926年引入了又一重大的小基础测向技术[4], 即沃森-沃特测向机。它能提供瞬时到达角信息。把两个正交环的输出直接加到阴极射线示波器的两个屏板上, 这样两个环的正交的正弦图形函数产生瞬时和。这项技术于1934年应用到阿德考克天线阵上。1938年有人用双信道相幅平衡的接收机使性能大为改善, 此时出现了第一台真正的瞬时测向机。

至1940年,第一代小基础测向机已经在使用中,主要是0.1-30MHZ频带内。在第一代测向机技术和硬件开发的同时,电离层传播的研究也在正进行。研究的重点是由电离层传播的水平极化信号、天波地波组合的模式、多径干扰、天波横向偏移和不规则电离层的漂移所造成小基础测向机的误差问题。此外,还对不理想场地条件进行了大量的分析试验工作;尝试了许多减小误差的方法,当然许多方法都不怎么成功。

这期间出现了一些基本的单环、交叉环、阿得考克、贝立尼-托西、沃森-沃特体制的衍生设备,例如由阿得考克衍生的间隔同轴环,且证明在减小天波误差上很有效。另外还有一些重大的改善:(1)解决了在所有的基本技术中都存在的到达角 180° 双值分解的技术;(2)多阵元测向天线阵的机械转换以减少示向度获取时间。

1920年美国国家标准局(NBS)建立了一个无线电信标网络,工作频率为285-315KHZ,用于海上无线电测向。国家标准局还研制了环形测向机,用于无线电信标系统。有关无线电自动测向机的研制工作加快了步伐,到三十年代后期,它们已被广泛用于空中和海上导航(三十年代美国建立了用于空中导航的无线电信标网络)。

第二次世界大战使小基础测向机得到飞速改进,其军用品被广泛使用,包括VHF和UHF测向机。这些系统在各种条件下的工作情况不仅显示了其军事上的优越性,同时也暴露了它们的局限性。这些局限性被充分地载入文献,且为二次大战后致力于中孔径、大孔径测向奠定了理论基础。

战争期间广泛使用了无线电测向网络。最突出的例子是美海军测向网,可对使用HF发射的敌方潜艇定位,这些网对通信、指挥、控制的要求比较高,这是把测向作为分散的传感器,而又集中起来的首次应用。在二次大战期间,飞机、舰和人员都广泛地使用了测向导航技术。

五十年代中期,对小基础测向的研究开发工作大大加强。重点是搞清电离层对测向性能所形成的主要限制[5]。研究中利用电离层探测器的数据对被考察的系统进行了测试。此外,研究了在舰载场地这种困难条件下对常规的小基础测向机作新的配置[6];对单环测向减小误差技术进行了研究和测试。总的来说,这些研究开发工作加深了人们对小基础测向误差源和局限性的认识,也发明了一些减小误差的技术。但是,许多误差源(例如在出现天波地波综合干扰的情况下)仍然是小基础测向的主要问题。

越南战争期间,敌军部队的通信使用水平极化、近于垂直入射的短波电离层传播。近于垂直入射的信号(NVIS)所产生的水平极化信号削减了小基础测向的性能。虽曾试用双正交基线、交叉环天线阵来测这种NVIS信号,但收效甚微。

越战中敌军部队使用的猝发通信方式使小基础非瞬时测向的性能受到挑战。显而易见必须进行瞬时测向或快速电子扫描,这种需求促使测向技术的更新。HF、VHF扩频调制的出现更增加了瞬时或近瞬时测向的必要性。到达角信息则是区分扩频信号的主要依据。

近数十年小基础测向的设计开发已有了很大进展。所研制出的第二代产品主要基于相位干涉测量和到达时间差技术。通常,只靠测幅的测向系统是对协同发射机测向的,诸如无线电信标导航归航、紧急定位发射机、野生动物跟踪寻源、人员或车辆发射机等为导航和归航设计的自动测向系统已纳进了先进的零幅伺服技术且扩展到VHF范围。

用于非协同型发射机测向的第二代小基础测向机具有宽带、瞬时或近瞬时性能,采用先进的信号处理算法以减小到达角误差。测向网工作具有快速的信号置定和增强的计算机支援。经常使用实时电离层探测数据来纠正或补偿由电离层传播所造成的误差。

下列领域的开发大大提高了用于小基础测向的相位和到达时间差技术:

1. 宽带天线; 2. 有源天线; 3. 低噪宽带射频前置放大器; 4. 电子天线扫描; 5. 宽带射频元件; 6. 固有的方向分辨率; 7. 平衡传输线; 8. 相位幅度相匹配的多通道接收机; 9. 数字调谐合成接收机; 10. 先进的中频--视频--数字信号处理; 11. 微处理机; 12. 健全的到达角算法; 13. 战术计算机; 14. 精密相位比较器, 时间间隔测定; 15. 实时电离层探测器支持; 16. 快速且任意竖架的天线杆; 17. 交互配合测向网

综 当前正针对HF单台定位(SSL)进行大量研究开发工作。中孔径型正在实际工作中获得地位,小孔径设备肯定也会跟上。电离层传播信号的到达方向信息加上电离层探测数据通过射线跟踪技术可以用来为信号源定位。所得精确度与电离层探测数据数量和质量成函数关系。

总而言之,在过去的九十多年中,小基础测向机一直在稳步发展。第一代系统使用幅度和幅度相位技术获取测向信息,已被有效地广泛应用。然而当用于电离层传播信号时性能还存在较大的限制性。第二代系统采用相位和到达时间差技术并得益于接收机、微处理机、元件、器件的发展。

将来随着宿主平台减小、对隐蔽要求增加,很可能在VHF以上频段也要求使用小基础测向技术。现代非协同发射测向的结构也将促使未来小基础测向新思路的形成。

1.3 现代应用领域

小基础测向有着广泛的应用领域。下面只是列了一些主要的方面及用于协同和非协同性辐射源测向的一些代表性功能。

△ 军事

· 协同性辐射源

空中海上导航

搜索与救援

伞兵救援

着落区集结

着落--降落区定位

人员车辆定位

辐射控制

频率管理

· 非协同性辐射源

通信情报

电子战斗序列

电子支援措施

辐射源归航和瞄准

友军定位

兵力估计

干扰源定位

△ 民用

· 协同性辐射源

空中海上导航

紧急信标定位

搜索与救援

- 伞兵救援
 - 野生动物跟踪
 - 人员车辆定位
 - 无线电位置标志
 - 非协同性辐射源
 - 频谱监视
 - 频谱密度校准
 - 秘密发射机定位
 - 天电定位(闪电干扰定位)
 - 业余无线电频率管理
 - △ 政府
 - 协同性辐射源
 - (与上列民用的相同)
 - 非协同性辐射源
 - 规章制度的推行
 - 频谱密度校准
 - 频谱监视
 - 准军事
 - △ 研究
 - 非协同性辐射源
 - 先进的通信情报调查
 - 测向网络结构
 - 无线电噪声的测定
 - 恶劣气候条件下的电磁研究
 - 协同性辐射源
 - 先进调制测向脆弱性
 - 传播研究
 - 元件器件的评估
 - 遥控环境传感
- 参考文献:

1. Reich, H.J., ed., *VHF Techniques*, Vol. 1, New York: McGraw-Hill Book Co., 1947, pp. 223-225.
2. Bailey, A.D., "HF Direction of Arrival Studies Over a Medium Range Path," *Proc. Conf. HF Radio Propagation*, Urbana, IL, August 1970, pp. 13-30.
3. Boyd, J.A., D.B. Harris, D.D. King, and H. W. Welch, Jr., ed., *Electronic Countermeasures*, Los Altos, CA: Peninsula Publishing: 1978, Chapter 10: "Direction Finding" by L.A. deRosa, pp. 10-3-10-4.
4. Travers, D.N., and S.M. Hixon, "Abstracts of the Available Literature on Radio Direction Finding: 1899-1965," San Antonio, TX: Southwest Research Institute, Contracts NObsr-64585/85086/89167, July 1966, pp. 1, 3, 37.
5. Bailey, A.D., J.D. Dyson, and E.C. Hayden, "Studies and Investigations Leading to the Design of a Radio Direction Finder System for the MF-HF-VHF Range," Urbana, IL: University of Illinois, Electrical Engineering Research Laboratory, Final Report No. 20, Project No. DA 36-039-AMC-03720(E), ASTIA No. AD 453 179, July 1964.
6. Travers, D.N., M.P. Castles, and W.M. Sherrill, "LF to VHF Surface Ship Direction Finding Research," San Antonio, TX: Southwest Research Institute, Interim Development Report, Contract NObsr-8917, ASTIA No. AD-465 791, May 1965.

第二章 工作原理

2.1 测向基本原理

一台测向机的首要功能是确定在无线电测向站所收到入射电磁波的到达方向。本章要叙述测向的一般性原理和小基础测向所用的特定测向技术。

图2.1表示了典型的无线电测向空间坐标系统 (X, Y, Z) , 无线电测向机在 $(0, 0, 0)$ 坐标点。平面 XY 为方位角或示向度角的平面。平面 ZY 和 ZX 为垂直入射角或仰角平面。与到达方向有关的到达角为方位角 ϕ , 从 Y 轴量出, 仰角 θ 从 Z 轴量出。 Z 轴通常与天顶角对齐。 Y 轴定为基准轴是零度, 根据具体工作的需要将它与真北、磁北、罗盘北或坐标北对齐。有些情况下(辟如在空中使用), 方位角平面可能与宿主平台的基准平面相重合。

测向的一般原理都是假定入射到无线电测向机的电磁场呈现为线性极化的远场平面波结构。如图2.1所示, 在径向的 E 场为零。在切线方向的 E 场为 E_t , 它与 H 场在空间正交。传播方向由波印亭矢量 \vec{P} (Poynting's vector)表示。

实际上, 入射电磁场通常不是平面的, 而带有相位--波前失真。这是由于不均匀的电离层传播效应产生多径、散射和去极化等现象所造成的。

无线电测向机的基本功能就是确定一个与 \vec{P} 相平行的径向量 \vec{Q} , 而 \vec{Q} 就是入射电磁波方向。一台全功能普通无线电测向机应该能在三维空间中测出到达方向。但许多工作情况只要求测出在方位平面上的方向分量 ϕ 。一个单坐标无线电测向系统只能在一个平面(通常是方位平面)上提供到达角信息。一个双坐标无线电测向系统能提供方位角和仰角信息。大多数小基础无线电测向系统都是单坐标系统, 只能提供方位角平面上的到达角数据。

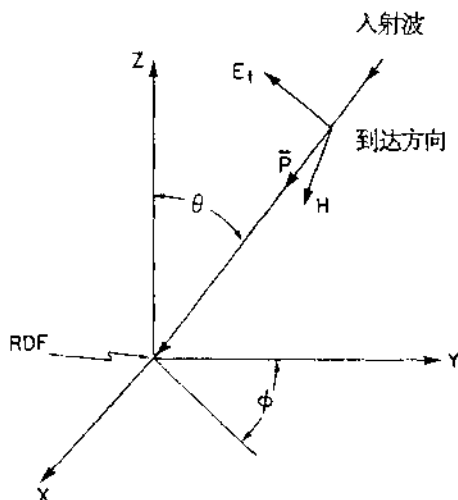


图2.1 无线电测向空间坐标系统

测出的到达角 ϕ 通常称为示向度或示向线(LOB)。所测的 ϕ 实际上只是一个示向度估计。示向度的严格定义[1]是:

(A)从地面上一点到另一点的水平方向,用基准线与两点连线的水平投影之间在水平面上的夹角表示。

(B)方位角。示向度与基准线的方向有关,通常应标明是真实的、地磁的、罗盘的、坐标的或相对的示向。

一个射频源的真实示向度永远是大圆示向度(GCB),因为电磁能量从射频源是按径方向传播的。无扰传输总是沿着大圆路径,这是在地球球形表面测到的两点间的最短距离。因此,从严格意义上讲,“示向度”这个词实际上是大圆示向度。本书将用“示向度”和“示向线”表示测得的示向,这一点与通常的用法不同。无论何时只要提到真实示向度或大圆示向度都是这个意思。

任何一台无线电测向机的最终目的都是要测得目标射频源的大圆示向度。然而效能最好时也只能提供一个估计的大圆示向度。

在许多测向应用中,主要感兴趣的是一个射频源的地理定位。地理定位的两个主要工作方法就是远距离测向和归航测向。从一个单址进行远距离地理定位需要三维测定,即距离、 ϕ 和 θ 。但是,由于无线电测向机是无源系统,从单址是不可能获得距离的(在单台定位中,可通过电离层射线跟踪获得距离)。因此,远距离地理定位需要从多址测定示向度。

从多个分散的远距离无线电测向站(或从一个移动的无线电测向机)获取示向度数据后,可运用三角测量技术估算出射频源的地理位置。三角测量就是使用从两个以上无线电测向位置获得的示向度来估算信号源地理位置的方法。有关三角测量技术有许多成文的材料,本书第七章中将详细叙述。

出于导航的目的,可能需要知道无线电测向站的地理位置。无线电测向机用来获取已知位置上射频源的示向度。射频源通常是协同性发射机,为了导航目的特意配置的。获取三个以上射频源位置的示向度,并用其反向示向线作三角测量标绘,估算出无线电测向机的地理位置。这种技术广泛地应用于空中、海上导航,可能是无线电测向技术最常见的用途了。

射频源实际地理定位可用归航法,也就是跟随指向射频源的示向度方向。当无线电测向机移动时,要不断地微调和校准以求得保持在测得的示向度上。这种射频源既可以是协同性的,也可以是非协同性的。

下节讨论小基础无线电测向技术。

2.2 小基础测向原理

2.2.1 绪言

小基础无线电测向机用三种测量方法来确定到达方向信息:

1. 幅度响应;

2. 相位延迟;

3. 时间延迟利用幅度响应、相位延迟或时间延迟将到达角 ϕ 和 θ 转换为模拟电压。基本的转换技术见下面的几节。

2.2.2 幅度响应

用于获取测向信息的幅度响应有两类:直接的和比较的。对于直接幅度响应而言,H场环天线或E场偶极子的方向特性有最小点。当它们按方位旋转时,在最小响应方位上可以取得示向度数据。环天线单元和偶极子在方位平面上呈现的是8字形响应(见图2.2)。响应最大值范围很宽,但最小值(零)是个锐角。幅度响应是 ϕ 的函数,其导数在零响应位置附近最大,因此动态测

量零位能提供最佳示向度估计。

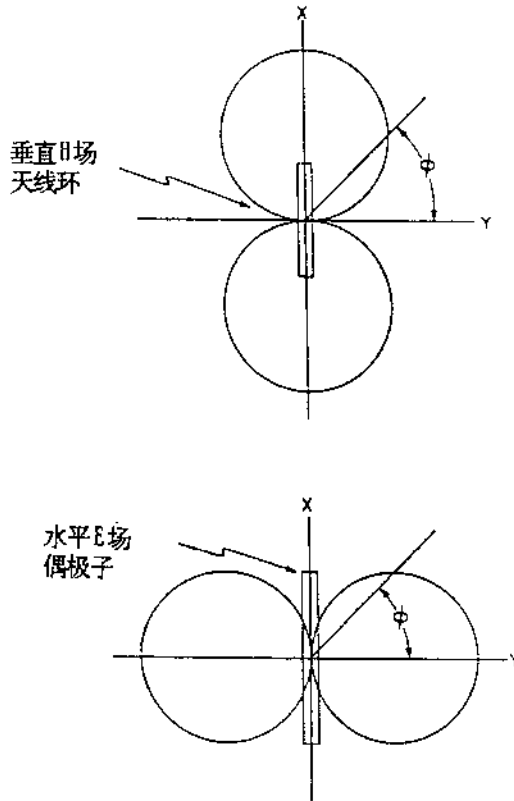


图2.2 方位角平面上响应图

当方向图在方位角平面内旋转时,进行连续的幅度测量,预定的零幅特性出现的方位角即是测得的示向度。

一个电小环天线,垂直于XY平面旋转时,它所感应电压V的求算公式为:

$$V = KE[\sin \phi \cos \psi - \cos \phi \cos \theta \sin \psi] \quad (2.1)$$

其中: $K = (2\pi / \lambda)$ (天线环面积, 环天线圈数)

E = 入射信号场强 (电压/米)

λ = 波长 (米)

ϕ = 传播方向与环天线平面之垂线间的方位角 (度)

θ = 以天顶角为基准的仰角 (度)

ψ = 入射信号极化倾斜角, 即环天线平面之垂线与E场矢量间的夹角 (度)。

公式(2.1)表明具有水平极化 ($\psi > 0^\circ$) 的非地表面波 ($\theta < 90^\circ$) 会产生示向误差, 这是环形天线测向系统最大的根本问题, 在第五章中将进一步探讨。

环天线示向度测量有一个 180° 的方位角双值性问题。有些情况这并不成问题。在必须解决双值性问题时，可把环天线输出与一垂直E场单元的输出相结合，获得只有一个零值的心型响应图，这样就不存在双值了。图2.3就是一个心型响应图。在有些无线电测向机中，心型图用来提供示向度信息。

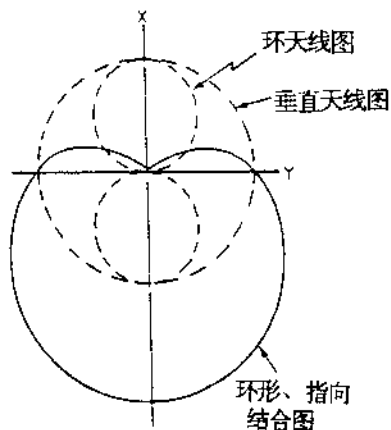


图2.3 心型图

水平E场偶极子很少用于测向，主要因为HF和VHF频段中人们感兴趣的信号多数都属垂直极化，与水平偶极子极化相反。

在比较幅度测向中，使用多个天线来获取正交“8”字形图（见图2.4）。由正交8字形图的幅度比得出示向度信息。根据图2.4，示向度 ϕ 可由下列函数求得：

$$\phi = \text{函数}[G_x(\phi)/G_y(\phi)] \quad (2.2)$$

$G_x(\phi)$ 和 $G_y(\phi)$ 响应转换成电压 V_x 和 V_y ，它们与示向角 ϕ 的正弦和余弦成正比。对 V_x/V_y 求对数，得算法对数 $\tan \phi$ ，再进一步处理就得示向度角 ϕ 。

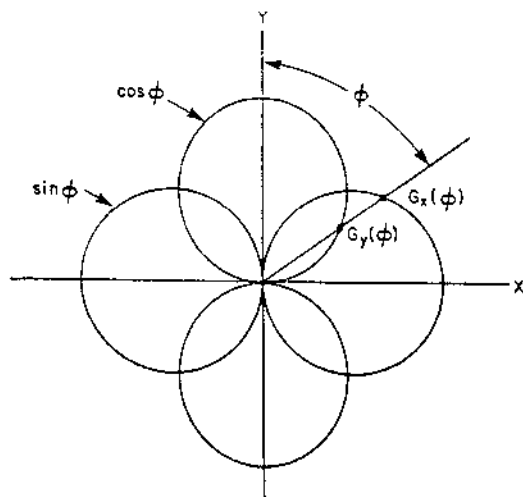


图2.4 幅度比较技术

幅度比较测向技术能提供瞬时示向度信息,且由于入射信号经比例处理而标称化了,从而使信号干扰对示向度测量的影响变小.这种测向技术也存在示向度的双值性.第五章中将讲到双值性解决办法及其它的设计考虑.

2.2.3 相位延迟

使用相位延迟测量示向度至少需要有二付分离开的天线.一个平面波到来时与两个天线单元基线成某一角度但不垂直,该电波抵达一个单元先于另一个单元.天线间的时间延迟就造成了天线输出间的射频相位延迟或射频相位差.

图2.5表示了相位延迟基本技术.一个入射平面波以入射角 ϕ 到达天线1,感应生成电压 $V_1 \exp(j\omega t)$,在经过了距离 $d \sin \phi$ 后,这个入射平面波又天线2上感应生成电压 $V_2 \exp(j\omega t - \tau)$ 这里 τ 为相位延迟,可由下式求得:

$$\tau = (2\pi d / \lambda) \sin \phi$$

因此方位角成了相位延迟 τ 的一个函数.

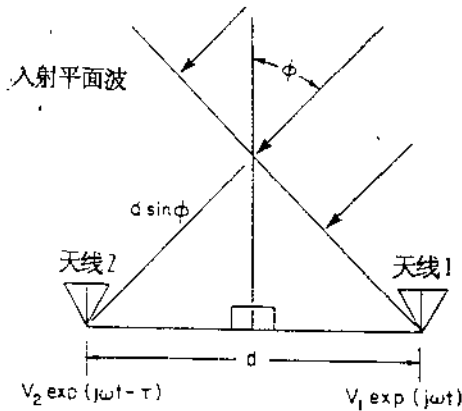


图2.5 相位延迟测向参数

图2.6所示为相位-幅度测向技术.横贯基线的射频相位差在一个 180° 的混合器中转换为幅度函数.这个幅度函数在小口径基线中呈现“B”字形响应图(这就是第一章中所说的著名的爱得考克测向技术).

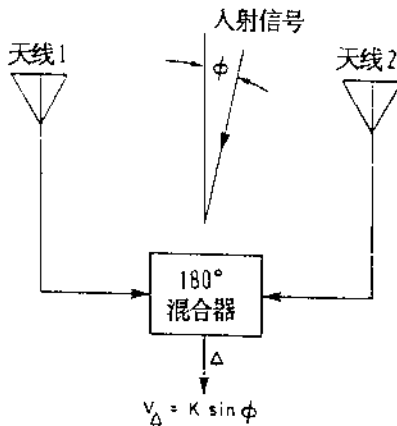


图2.6 相位延迟幅度测向技术

图2.7表示测量射频相位延迟 T 的相位干涉技术。每个天线单元的输出经过分别地接收—处理并转换成中频信号。由相位比较器测出各信道间的射频相位差 T 。

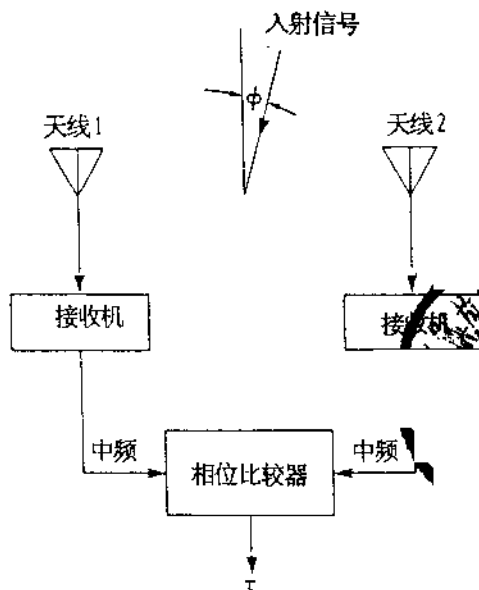


图2.7 直接的相位(干涉仪)测向测量

在两种相位延迟技术中,都使用公式(2.3)计算方位角(ϕ)。在公式(2.3)中相位延迟 T 是测得的,基线距离 d 和波长 λ 是已知的。使用这两种技术都会出现相位和方位角的多值性。如果 $d > \lambda/2$,存在相位多值,但对小基线测向应用来说,相位多值不是什么问题。使用辅助天线建起已知的相位基准即可解决方位角多值问题。第五章中将进一步讨论多值的解决和其它设计根据等问题。

相位测量法的一种派生方法是多普勒测向。通常认为多普勒测向是一种中孔径技术,然而它的运用却正在小孔径领域发展着。多普勒测向的基本原理如下:

一个运动的天线接收到的频率会有多普勒漂移。如果天线沿着正对发射机位置的径向移动,多普勒漂移最大。若天线的运动与传播方向相切,则不出现多普勒漂移。利用这些多普勒漂移的最大值与最小值可以测量入射信号的方位角。

如果天线沿半径为 r 的圆旋转,多普勒频率漂移呈正弦曲线变化。若 f_r 为旋转速率, λ 为信号波长,那么多普勒漂移的峰值为 $2\pi r f_r / \lambda$ 。信号方位角是旋转圆上最大多普勒漂移点的切线方向,即天线运动的方向。

实际上并不采用机械旋转天线方法,而是使用伪多普勒技术。伪多普勒测向是用一个固定的圆形天线阵顺序转接到普通接收机上顺序测量相位。顺序抽样提供了在各个角度上多普勒引起的频率偏移。对各抽样点上获取的多普勒幅度进行处理并求平均值以获得最大多普勒漂移角,也即获得方位角测量值。第五章中还将讨论多普勒测向技术。

2.2.4 时间延迟

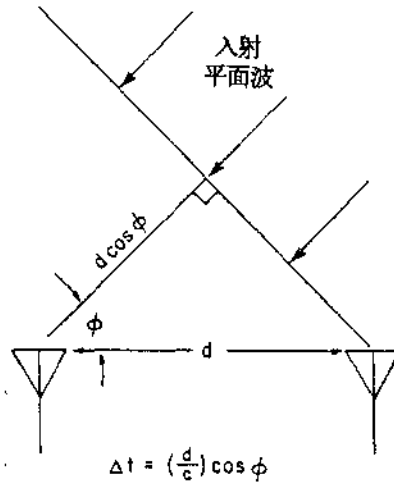


图2.8 到达时间差参数

在两个分离天线间传播的电磁波会有一个时间延迟，这个到达时间差 (TDOA) 包含了方位角信息。图2.8中，天线1和天线2之间的时间延迟差 Δt 由下式求取：

$$\Delta t = (d/c) \cos \phi \quad (2.4)$$

式中： d = 天线1,2之间的距离 (米)

c = 光速

ϕ = 方位角(度)

到达时间差技术历来用于脉冲传输，诸如雷达，也使用比较长的多个波长的基线。这些因数看来与HF和VHF应用小孔径技术有矛盾。然而HF、VHF脉冲性传输的出现和测量时间间隔精确性的提高，增加了把到达时间差技术应用到小孔径HF和VHF测向的潜在可能。第五章中将深入讨论到达时间差在小孔径中的应用问题。

参考文献

1. Jay, Frank, ed., "IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms," ANSI/IEEE Standard 100-1988, New York: Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc., 1988.
2. Stansfield, R.G., "Statistical Theory of DF Fixing," *Proc. IEEE*, Vol. 94, Part 3A, No. 15, 1947, pp. 762-770.
3. Wiley, R.G., *Electronic Intelligence: The Interception of Radar Signals*, Norwood, MA: Artech House, 1985, Chapter 5.