



高等学校工程创新型“十二五”规划教材
电子信息科学与工程类

电子探测原理

Electronic Detection Principle

唐劲松 汤子跃 许炎义 胡金华 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等学校工程创新型“十二五”规划教材
电子信息科学与工程类

电子探测原理

唐劲松 汤子跃 编著
许炎义 胡金华

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为配合教育部“卓越工程师教育培养计划”和军队教育改革而编写。雷达和声呐在发展过程中相互借鉴、相互学习、相互促进,其工作原理具有高度的相似性,而电子对抗(含水声对抗)与雷达和声呐是矛和盾的关系。将三者工作原理一起讲授,不仅可以在大大缩短学时的前提下加深对三者原理的理解,还可以培养批判性思维,有利于提升创新能力。

本书讲解雷达、声呐和电子对抗基本工作原理,主要内容分成四大部分。第一部分讲解雷达和声呐系统构成和基本原理,包括发射机和接收机,雷达和声呐测距、测角和测速的基本原理,以及多普勒效应在动目标检测中的应用;第二部分讲解雷达和声呐信号和信息处理及雷达和声呐方程,包括雷达和声呐最优信号检测器与估计器、模糊函数、距离和频率分辨理论、距离和频率测量精度分析、雷达数据处理和显示,以及雷达与声呐方程;第三部分介绍预警体系结构、新体制雷达与声呐以及海洋仪器的基本原理;第四部分讲解电子对抗和抗干扰的基本原理。

本书可作为电子科学与技术、雷达、水声工程、电子工程和海洋工程等专业的本科生和研究生的教材,也可作为相关领域工程技术人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电子探测原理 / 唐劲松等编著. —北京: 电子工业出版社, 2014. 1
高等学校工程创新型“十二五”规划教材
ISBN 978-7-121-22054-8

I. ①电… II. ①唐… III. ①带电粒子探测—高等学校—教材 IV. ①O572.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 286649 号

策划编辑: 陈晓莉

责任编辑: 陈晓莉

印 刷: 北京市李史山胶印厂

装 订: 北京市李史山胶印厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 17.75 字数: 454 千字

印 次: 2013 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

世界军事变革主要特征是以信息化为动力,以军事技术、军事理论创新和军队体制结构调整为核心内容。为了提高打赢信息化条件下局部战争能力为核心的完成多样化军事任务能力,军队院校合训专业课程的教学必须有创新性的革命。

雷达、声呐和电子对抗装备是海军信息作战的重要装备。海军院校学历教育中电子科学与技术合训专业学员的任职面向雷达、声呐和电子对抗装备。以前这三种装备的原理分成三门课程教学,一般只能讲授其中的一到两门,难以保证学员适应第一任职需要。考虑到三者的相似性和关联性,本教材将三者原理合并讲解。这样教学的好处是在较短学时内,不仅可以加深学员对三种装备原理的融会贯通的理解,而且有利于培养创新意识。地方高校的电子工程海军国防生有同样的需求。

海洋仪器大都与雷达和声呐相关,如地波雷达、导航雷达、声多普勒流速剖面仪、声相关流速剖面仪、图像声呐和水声通信等,因此海洋物理专业的学生迫切需要雷达和声呐两方面的知识,本教材可以作为海洋物理专业本科或研究生教材。

本教材在编写思路,突出内容的新颖性、综合性和实用性,主要介绍雷达、声呐原理,包括:目标检测、目标参数测量(含距离测量、角度测量、频率测量)、多普勒效应及应用、信号理论基本知识(含模糊函数、距离和频率分辨理论、距离和频率测量精度分析)、数据处理基本概念、新体制雷达和声呐;以及电子对抗和抗干扰的基本原理。本教材参考学时数为60学时。

每章配有习题。有些章节还都给出开放性习题,包括计算机仿真作业和论述题,虽然这些习题对本科学生可能有一定的难度,但相信对掌握教材的内容有很好的帮助。

本书由唐劲松教授担任主编。编写分工如下:第1章、第5章、第9章和第4章(部分)由唐劲松教授编写,第6章、第7章、第8章由汤子跃教授、唐劲松教授合写,第3章和第10章由许炎义教授编写,第2章、第4章(部分)由胡金华副教授编写。

本书由南京电子技术研究所林幼权研究员、哈尔滨工程大学孙大军教授和海军工程大学黄高明教授担任主审。他们对本教材提出了许多中肯的意见和建议,在此表示诚挚的感谢。参与本书编辑和校对的有:卢建斌博士、张森博士、钟何平博士、张学波博士和程广利博士。电子工业出版社的陈晓莉编审与作者进行了大量沟通,提出了许多宝贵意见,在此一并表示感谢!

参考文献难以列全,对所引用资料未标注的作者表示歉意和谢意!

囿于编者的水平,谬误之处,恳请同行批评指正。

编 者

目 录

| | |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 电子探测系统的任务 | 1 |
| 1.1.1 目标的探测 | 1 |
| 1.1.2 目标参数测量 | 2 |
| 1.1.3 目标成像及识别 | 4 |
| 1.1.4 雷达与声呐工作波段划分 | 5 |
| 1.2 电子探测系统的组成与应用 | 8 |
| 1.2.1 被动探测系统的组成 | 8 |
| 1.2.2 主动探测系统的组成 | 8 |
| 1.2.3 雷达和声呐的分类 | 9 |
| 1.3 电子探测系统战术和技术指标 | 10 |
| 1.3.1 探测能力技术指标 | 10 |
| 1.3.2 估计精度技术指标和分辨率技术指标 | 11 |
| 1.3.3 电子探测系统主要技术参数 | 12 |
| 1.4 电子探测系统的发展史 | 13 |
| 1.4.1 雷达发展史 | 13 |
| 1.4.2 声呐发展史 | 16 |
| 思考题与习题 | 21 |
| 参考文献 | 21 |
| 第 2 章 发射与接收系统 | 22 |
| 2.1 发射系统的功能和技术指标 | 22 |
| 2.2 雷达发射系统 | 24 |
| 2.2.1 发射系统的组成 | 24 |
| 2.2.2 主振放大式发射机 | 24 |
| 2.2.3 固态发射机 | 26 |
| 2.2.4 频率合成器 | 28 |
| 2.2.5 当前常用频率合成技术及其特点 | 29 |
| 2.3 声呐发射系统 | 32 |
| 2.3.1 声呐发射系统的组成及作用 | 32 |
| 2.3.2 匹配网络 | 33 |
| 2.3.3 收发转换开关 | 35 |
| 2.4 接收系统的组成及技术指标 | 36 |
| 2.4.1 雷达接收机的组成及技术指标 | 36 |
| 2.4.2 声呐接收机的组成及技术指标 | 38 |
| 2.4.3 数字化接收机 | 39 |
| 2.5 噪声系数和灵敏度 | 40 |
| 2.5.1 噪声系数 | 40 |

| | |
|---------------------------|-----------|
| 2.5.2 灵敏度 | 41 |
| 2.6 动态范围和增益控制 | 41 |
| 2.6.1 动态范围 | 41 |
| 2.6.2 增益控制 | 42 |
| 2.6.3 对数放大器 | 43 |
| 思考题与习题 | 44 |
| 参考文献 | 44 |
| 第3章 距离测量 | 45 |
| 3.1 脉冲测距 | 45 |
| 3.1.1 脉冲测距原理 | 45 |
| 3.1.2 距离分辨率 | 46 |
| 3.1.3 距离测量精度 | 46 |
| 3.2 调频测距 | 47 |
| 3.2.1 调频连续波测距基本工作原理 | 47 |
| 3.2.2 运动目标的调频连续波测距 | 48 |
| 3.2.3 调频连续波雷达特点 | 48 |
| 3.3 相位测距 | 49 |
| 3.4 雷达距离跟踪 | 49 |
| 3.4.1 人工距离跟踪 | 50 |
| 3.4.2 自动距离跟踪 | 51 |
| 3.5 声呐被动测距 | 52 |
| 3.5.1 基于距离差的被动测距 | 53 |
| 3.5.2 基于相位差的被动测距 | 53 |
| 3.5.3 两种方法的对比及应用 | 53 |
| 思考题与习题 | 54 |
| 参考文献 | 54 |
| 第4章 角度测量原理 | 55 |
| 4.1 测角基本方法 | 55 |
| 4.1.1 幅度测角原理 | 55 |
| 4.1.2 相位测角原理 | 58 |
| 4.1.3 互谱测角原理 | 60 |
| 4.2 线阵天线波束扫描方法 | 61 |
| 4.2.1 窄带线阵波束形成与方向性图 | 62 |
| 4.2.2 圆阵与圆弧阵的波束形成 | 67 |
| 4.2.3 宽带波束形成 | 70 |
| 4.2.4 加权 | 71 |
| 4.2.5 加挡 | 74 |
| 4.3 波束扫描方式 | 76 |
| 4.3.1 雷达波束形状和扫描方法 | 76 |
| 4.3.2 声呐波束扫描 | 77 |
| 4.4 雷达自动测角和角度跟踪 | 79 |
| 4.5 相控阵雷达 | 81 |

| | | |
|------------|--------------------|------------|
| 4.5.1 | 相控阵天线和相控阵雷达的特点 | 81 |
| 4.5.2 | 相控阵波束扫描三种基本方式 | 82 |
| 4.5.3 | 平面相控阵雷达波束形成 | 84 |
| 4.5.4 | 相控阵雷达的馈电和馈相方式 | 86 |
| 4.5.5 | 有源相控阵 | 87 |
| 4.5.6 | 数字阵列雷达 | 89 |
| 4.6 | 三坐标雷达 | 90 |
| 4.6.1 | 三坐标雷达的数据率 | 90 |
| 4.6.2 | 单波束、多波束三坐标雷达 | 91 |
| 4.6.3 | 仰角测量范围和高度测量 | 92 |
| | 思考题与习题 | 94 |
| | 参考文献 | 94 |
| 第5章 | 运动目标检测和速度测量 | 95 |
| 5.1 | 径向速度的测量 | 95 |
| 5.1.1 | 多普勒效应 | 95 |
| 5.1.2 | 多普勒信息的提取方法 | 98 |
| 5.2 | 运动目标显示与检测 | 101 |
| 5.2.1 | 雷达动目标显示(MTI)工作原理 | 101 |
| 5.2.2 | 雷达动目标检测(MTD)工作原理 | 105 |
| 5.2.3 | 运动杂波的抑制 | 108 |
| 5.3 | 声呐的自身多普勒(ODN)抑制技术 | 108 |
| 5.3.1 | 改变本振信号的频率 | 108 |
| 5.3.2 | 改变发射信号的频率 | 109 |
| 5.4 | 运动平台雷达动目标检测技术 | 109 |
| 5.4.1 | 多普勒雷达的杂波特点 | 109 |
| 5.4.2 | 机载动目标显示(AMTI) | 115 |
| 5.4.3 | PD雷达脉冲重复频率的选择 | 117 |
| 5.4.4 | 不同重复频率PD雷达信号处理 | 120 |
| 5.4.5 | 距离模糊的消除 | 120 |
| 5.5 | 切向速度测量原理 | 121 |
| | 思考题与习题 | 122 |
| | 参考文献 | 124 |
| 第6章 | 信号理论基础 | 125 |
| 6.1 | 匹配滤波器 | 125 |
| 6.1.1 | 白噪声背景下的匹配滤波器 | 125 |
| 6.1.2 | 色噪声背景下的匹配滤波器 | 126 |
| 6.1.3 | 匹配滤波器增益 | 126 |
| 6.2 | 信号检测 | 127 |
| 6.2.1 | 信号检测模型和似然比 | 127 |
| 6.2.2 | 被动声呐信号检测 | 127 |
| 6.2.3 | 主动雷达和声呐信号检测 | 129 |
| 6.2.4 | 恒虚警检测 | 132 |

| | | |
|------------|---------------------|------------|
| 6.3 | 信号的模糊函数 | 133 |
| 6.3.1 | 模糊函数的定义 | 134 |
| 6.3.2 | 典型信号的模糊函数 | 135 |
| 6.3.3 | 宽带模糊函数 | 139 |
| 6.4 | 信号模糊函数的应用 | 139 |
| 6.4.1 | 距离和频率分辨率 | 139 |
| 6.4.2 | 多普勒容限 | 141 |
| 6.4.3 | 距离和速度估计及测量精度 | 142 |
| 6.5 | 脉冲压缩技术 | 144 |
| 6.5.1 | 线性调频信号及其脉冲压缩处理 | 144 |
| 6.5.2 | 脉冲压缩处理的主要指标 | 149 |
| | 思考题与习题 | 149 |
| | 参考文献 | 150 |
| 第7章 | 数据录取、处理和显示 | 151 |
| 7.1 | 雷达目标坐标参数的录取方法 | 151 |
| 7.1.1 | 目标距离数据的录取方法 | 151 |
| 7.1.2 | 目标角度数据的录取方法 | 152 |
| 7.1.3 | 目标高度数据的录取方法 | 152 |
| 7.1.4 | 其他参数的录取方法简介 | 153 |
| 7.2 | 雷达和声呐的显示终端 | 155 |
| 7.2.1 | 雷达的显示器 | 155 |
| 7.2.2 | 声呐的显示器 | 158 |
| 7.3 | 雷达数据处理 | 158 |
| 7.3.1 | 雷达数据处理分类及术语定义 | 158 |
| 7.3.2 | 雷达数据处理的实现 | 161 |
| | 附:标准卡尔曼滤波公式 | 169 |
| | 思考题与习题 | 170 |
| | 参考文献 | 170 |
| 第8章 | 雷达与声呐方程和目标特性 | 171 |
| 8.1 | 雷达方程 | 171 |
| 8.1.1 | 基本雷达方程 | 171 |
| 8.1.2 | 雷达最大作用距离 | 172 |
| 8.1.3 | 脉冲压缩雷达方程 | 173 |
| 8.2 | 雷达目标截面积 | 174 |
| 8.2.1 | 窄带雷达目标截面积 | 174 |
| 8.2.2 | 高分辨力雷达目标截面积 | 174 |
| 8.2.3 | 目标截面积与雷达工作波长的关系 | 175 |
| 8.2.4 | 雷达目标特性与极化的关系 | 176 |
| 8.3 | 雷达杂波模型 | 177 |
| 8.3.1 | 地、海面反射特性 | 177 |
| 8.3.2 | 杂波的幅度起伏 | 179 |
| 8.4 | 雷达目标起伏模型 | 181 |

| | |
|----------------------------|------------|
| 8.5 声呐方程 | 182 |
| 8.5.1 声呐方程中出现的参数 | 182 |
| 8.5.2 被动声呐方程 | 183 |
| 8.5.3 主动声呐方程 | 184 |
| 思考题与习题 | 185 |
| 参考文献 | 188 |
| 第9章 探测与预警新技术 | 189 |
| 9.1 探测与预警系统简介 | 189 |
| 9.1.1 天基预警系统 | 189 |
| 9.1.2 空基探测与预警系统 | 191 |
| 9.1.3 陆基探测与预警系统 | 196 |
| 9.1.4 海基探测与预警系统 | 198 |
| 9.1.5 水下探测与预警系统 | 207 |
| 9.2 合成孔径成像与干涉合成孔径成像 | 209 |
| 9.2.1 合成孔径成像原理 | 209 |
| 9.2.2 逆合成孔径雷达成像原理 | 212 |
| 9.2.3 干涉合成孔径原理及应用 | 213 |
| 9.3 超视距雷达 | 215 |
| 9.3.1 地波和天波超视距 | 215 |
| 9.3.2 微波大气波导超视距雷达 | 216 |
| 9.4 声学海洋仪器 | 217 |
| 9.4.1 图像声呐 | 217 |
| 9.4.2 海流速度剖面仪 | 220 |
| 9.4.3 水声定位技术 | 221 |
| 9.5 被动多基地雷达 | 226 |
| 9.5.1 基于时差定位 | 227 |
| 9.5.2 到达方向交叉定位 | 227 |
| 9.5.3 差分多普勒定位 | 227 |
| 9.6 空时二维自适应处理 | 227 |
| 9.6.1 空域滤波 | 228 |
| 9.6.2 从信号检测谈起 | 228 |
| 9.6.3 雷达杂波的空时二维谱 | 229 |
| 9.6.4 空时信号模型 | 230 |
| 9.6.5 最优空时二维处理 | 232 |
| 9.6.6 空一时二维处理的降维 | 233 |
| 思考题与习题 | 234 |
| 参考文献 | 234 |
| 第10章 电子对抗基本原理 | 235 |
| 10.1 电子对抗及分类 | 235 |
| 10.1.1 电子对抗定义 | 235 |
| 10.1.2 电子对抗分类 | 236 |
| 10.2 电子对抗中的信号侦测 | 236 |

| | | |
|--------|--------------------|-----|
| 10.2.1 | 侦察系统主要技术指标 | 237 |
| 10.2.2 | 测频接收机 | 238 |
| 10.2.3 | 信号处理和参数估计 | 241 |
| 10.3 | 电子对抗中的电子进攻技术 | 243 |
| 10.3.1 | 电子进攻的概念和分类 | 243 |
| 10.3.2 | 干扰方程 | 246 |
| 10.3.3 | 有源干扰 | 247 |
| 10.3.4 | 无源干扰 | 249 |
| 10.3.5 | 隐身技术 | 251 |
| 10.3.6 | 电子战中的摧毁技术 | 252 |
| 10.4 | 有源干扰基本原理 | 255 |
| 10.4.1 | 压制性干扰原理 | 255 |
| 10.4.2 | 欺骗式干扰原理 | 261 |
| 10.5 | 电子对抗中的电子防护技术 | 266 |
| 10.5.1 | 反电子侦察 | 266 |
| 10.5.2 | 防止干扰进入接收机的技术 | 267 |
| 10.5.3 | 接收机抗干扰技术 | 269 |
| 10.6 | 电子对抗军事意义与运用 | 271 |
| 10.6.1 | 贝卡谷地空战 | 271 |
| 10.6.2 | 海湾战争 | 272 |
| | 思考题与习题 | 273 |
| | 参考文献 | 273 |

第1章 绪论

1.1 电子探测系统的任务

电子探测系统是重要的战场传感器,其中雷达和声呐在电子探测系统中占据了重要地位。雷达是英文“radar”的音译,是英文 Radio Detection and Ranging 的缩写,原意是“无线电探测和测距”,即用无线电方法检测目标并测定它们在空间的位置。因此,雷达也称为“无线电定位”。声呐是英文“sonar”的音译,是英文 Sound Navigation Ranging 的缩写,原意是“声导航和定位”。

雷达和声呐主要任务包括:目标的探测,目标的距离、方位和仰角测量,目标的速度测量,目标成像和目标识别。

雷达有主动和被动之分。主动雷达大部分都自己发射电磁波,它是利用目标的回波对目标进行探测和定位。主动雷达还可以采用应答方式工作,称为二次雷达,它要求目标为合作目标,如航管雷达。二次雷达信噪比高,距离、角度测量估计精度高,且目标应答时,可为雷达提供自身的番号等信息,可用于目标的类型判别和敌我目标识别。被动雷达利用目标自身辐射、广播电视或背景辐射电磁波对目标进行定位,被动雷达如俄罗斯“铠甲”、美国的寂静哨兵和电磁辐射计等。被动雷达具有隐蔽性好的优点,可以有效地对付反辐射导弹。

被动声呐利用目标的声辐射(机械噪声和螺旋桨空化噪声)来发现目标并测定其参数,主动声呐发射声波并接收目标的回波来发现目标并测定其参数。主动声呐和被动声呐在应用中平分秋色。被动声呐一般用于潜艇声呐和固定式水下声呐站,主动声呐多用于水面舰艇声呐和海洋仪器。应答方式工作的声呐主要用于定位,也用于敌我识别。

雷达的工作原理是利用太空或大气中电磁波的传播与反射,它的工作环境只能是太空或大气。因为海水是电的良好导体,它使电磁能很快地以热的方式耗散掉。因此,在海水中,相同波长的电磁波比声波的衰减快得多。声呐的工作原理是利用声波的传播与反射,它的工作环境只能在水中和空气中,不能工作在太空,因为声波是机械波,它必须借助介质传播。

1.1.1 目标的探测

目标的探测是信号检测问题,即判断目标的有无。通常它也是目标参数测量的前提。我们把雷达或声呐接收到的目标回波或辐射波称为信号。信号的幅度与目标特性、传播损失、主动探测设备的发射功率、天线或基阵孔径(尺寸)有关。

信号检测的背景是复杂的,如雷达中的热噪声、电磁干扰和雷达杂波;声呐中的海洋背景噪声、流噪声和平台自噪声,以及主动声呐中的混响等。

雷达的杂波来自地面、云雨或海表面的不希望电磁散射。主动声呐混响来自水体、海底和海面的不希望的声散射。它们不同于噪声和干扰,其强度随发射功率增大而增大。因此,雷达杂波和主动声呐混响具有相似的属性。

信号检测的性能取决于信噪比。雷达检测性能取决于信噪比、信杂比和信干比,检测背景分别对应于热噪声、杂波和电子干扰。声呐检测性能取决于信噪比、信混比和信干比,检测背

景分别对应于噪声背景、混响背景和水声对抗器材的干扰。

1.1.2 目标参数测量

1. 雷达和声呐可测量的参数

目标参数的测量是参数估计问题。雷达和声呐的测量参数基本相同。以雷达参数测量为例进行说明,图 1.1 所示为采用极坐标表示目标在空间的位置。

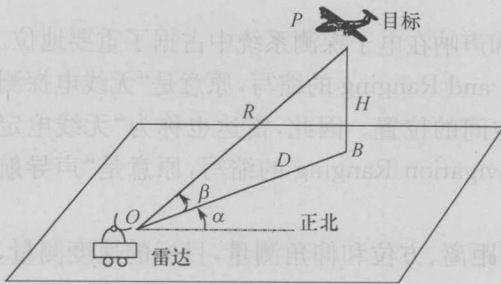


图 1.1 目标位置的极坐标表示

① 目标的斜距: 雷达到目标的直线距离 OP 。在雷达、声呐中斜距简称距离。

② 方位角 α : 目标斜距 R 在水平面上的投影 OB 与某一起始方向(正北、正南或其他参考方向)在水平面上的夹角。声呐方位一般用左右舷来区分。

③ 仰角 β : 目标斜距 R 与它在水平面上的投影在铅垂面上的夹角,也称为倾角或高低角。

雷达参数测量可以是二维的,也可以是三

维的;分别称为二坐标雷达和三坐标雷达。二坐标雷达测量的参数有目标的距离和方位;三坐标雷达测量的参数有目标的距离、方位和俯仰角。

声呐参数测量可以是一维、二维乃至三维。被动声呐一般仅能测量目标的方位,即一维测量;被动测距声呐利用三点式被动测距,可测量出目标的距离和方位参数,即二维测量。主动声呐可以测量目标的距离和方位。匹配场声呐可以给出目标在圆柱坐标中的参数,即目标的方位、水平距离和深度,即三维测量。由于声线在水中传播是弯曲的,给出俯仰角是没有意义的。

此外,雷达和声呐还可以测量目标的速度。雷达还可以测量目标的极化特性。

2. 基本测量原理

(1) 距离测量

距离测量的物理基础是波在均匀介质的自由空间中匀速直线传播。在距离测量中,绝大部分采用脉冲测距。以雷达为例说明如下。雷达工作时,发射机经天线向空间发射一串重复周期一定的高频脉冲。如果在电磁波传播的途径上有目标存在,那么雷达就可以接收到由目标反射回来的回波。由于回波信号往返于雷达与目标之间,它将滞后于发射脉冲一个时间 t_r ,如图 1.2 所示。而电磁波是以光速 c 传播的,设目标相对雷达的距离为 R ,由于电磁波传播的距离是双程的,因此有:

$$R = \frac{ct_r}{2} \quad (1.1)$$

电磁波在真空中传播的速度约为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$,声波在海水中传播的速度约为 1500 m/s 。

测距还可以采用应答测距方式。应答测距信噪比高,精度高,还可以给出目标的属性,便于敌我目标识别。应答测距方位广泛用于航管雷达、水声定位中长基线、短基线和超短基线定位声呐,此外通信声呐也可进行应答测距。

测距思想还用于相对时差的测定,利用相对时差也可以对目标进行定位。相对时差定位有统一时钟和波形互相关的两种方式。例如,GPS 就是基于统一时钟的时差来定位的。

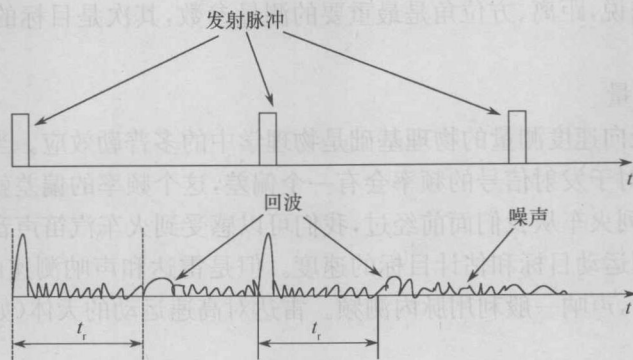


图 1.2 脉冲测距的原理图

潜艇声呐出于隐蔽考虑,可采用三点式被动测距。被动测距也是利用相对时差进行的,在测量相对时差时,通常采用基于互相关时延测距或基于相位差测距。

对于脉冲工作的雷达和声呐,其测距精度与信号带宽成反比,与信噪比的开方成反比。

(2) 角度测量

角度测量的物理基础是天线或基阵的指向性及其在均匀介质的自由空间中波按直线传播。阵的指向性是指电磁波或机械波能量在空间的具有聚集的特性,像探照灯的光束具有聚集的特性一样,如图 1.3 所示。阵的指向性可以用波束的宽度描述。波束宽度 θ 与工作波长 λ 及天线的尺寸 D 的关系如下:

$$\theta \approx 0.88 \frac{\lambda}{D} (\text{弧度}) \approx 50 \frac{\lambda}{D} (\text{度})$$

但天线或基阵仅有指向性还不够,为了定向,波束的方向必须能改变以扩大搜索范围。改变波束方向的方式分为机械扫描和电子扫描。

雷达波束通常是采用机械扫描,旋转的雷达天线我们经常见到。还有一种改变波束的方式是利用载体的直线运动,如侧扫声呐、合成孔径雷达、全向声呐等。机械扫描的波束在空间上出现有先有后,这种波束称为顺序波瓣。

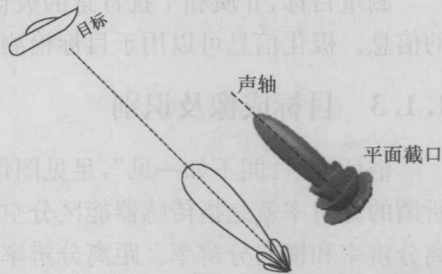


图 1.3 基阵的指向性

电子扫描方式的工作基础是天线阵列或声阵列,它有发射波束扫描和接收波束扫描两部分。发射波束扫描通常称为相控发射,它通过改变阵元的发射信号的相位来改变波束的方向。但随着信号带宽的增加,需要采用延时的方法来改变波束方向。接收扫描是采用波束形成技术在空间同时形成多个波束,它可分为窄带波束形成和宽带波束形成两大类,分别采用移相和延时形成波束。

角度测量中也可能是发射宽波束接收窄波束。这类方位测量的方法在声呐中很常见,也见于地波和天波雷达。它们采用信号处理方式同时形成指向不同的多个波束。因此,地波、天波雷达天线、部分相控阵雷达天线和声呐的基阵通常不需要旋转,能同时给出多个方位波束,称为同时波瓣。

雷达和声呐角度测量的精度与波束宽度成正比,与信噪比的开方成反比。所以,波束越窄,信噪比越高,角度测量精度越高。

对雷达和声呐来说,距离、方位角是最重要的测量参数,其次是目标的俯仰角(对于雷达)和深度(对于声呐)。

(3) 径向速度测量

电子探测系统径向速度测量的物理基础是物理学中的多普勒效应。当目标与雷达有径向运动时,回波信号相对于发射信号的频率会有一个偏差,这个频率的偏差就是多普勒频率。当我们站在站台上,一列火车从我们面前经过,我们可以感受到火车汽笛声音频率的改变。利用信号的频移可以检测运动目标和估计目标的速度。但是雷达和声呐测速的方法是不同的,雷达一般利用脉间测频,声呐一般利用脉内测频。雷达对高速运动的天体(如卫星、洲际导弹)也可以采用脉内测频。

利用空间分布的两个电子探测设备(站)同时测量目标的径向速度,可以得出目标的速度矢量。例如,在海流测量中,通常利用两台地波雷达测量海流矢量。

雷达和声呐测频精度与测量时间的宽度成反比,与信噪比的开方成反比。需要说明的是,对于雷达的脉间测频,其时间宽度是多个脉冲持续的时间,而非单个脉冲的宽度。

(4) 切向速度测量

如果目标距离相对传感器没有改变,即径向速度等于零,那么回波是没有多普勒频偏的,利用多普勒效应无法测量目标的切向速度。切向速度测量基于空域多普勒频率,这包括真实孔径和合成孔径方法。真实孔径利用沿切向布置的阵列天线工作,其基本原理是波形不变原理。声相关流速剖面仪(ACCP)就是采用这一原理工作的。合成孔径方法采用单传感器,利用回波多普勒斜率来估计目标切向速度。

(5) 极化测量

测量目标、介质和干扰背景的极化散射矩阵,在一定程度上可获得雷达目标的构成及属性的信息。极化信息可以用于目标检测、分辨和识别。

1.1.3 目标成像及识别

俗话说“百闻不如一见”,足见图像的重要性。成像雷达或声呐的特点就是分辨率非常高。所谓的分辨率就是指传感器能区分空间两个目标的能力。对于二维成像来说,分辨率包括距离分辨率和横向分辨率。距离分辨率与发射信号的带宽有关,带宽越宽,分辨率越高。对于真实孔径成像来说,横向分辨率取决于波束宽度,波束越窄,分辨率越高,真实孔径成像分辨率还与距离有关,距离越远,分辨率越低,人眼就是真实孔径成像,远处东西的细节看不清楚。真实

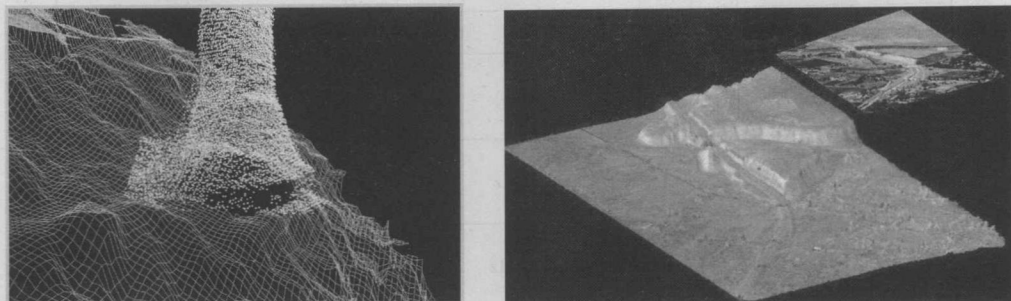


图 1.4 美国 Mini SAR 成像结果

孔径成像一般用于近距离、要求不高的水声成像。1950年Wiley提出的一个划时代的思想,即距离—多普勒成像原理。它利用多普勒频率来提高横向分辨率,这个原理是合成孔径雷达和合成孔径声呐的基石。在合成孔径成像中,波束越宽,分辨率越高,正好与真实孔径相反。目前SAR的成像分辨率甚至超过同等距离上的光学图像。图1.4是美国捕食者无人机携带的Mini SAR成像结果。

雷达和声呐不仅可以得到测绘场景的二维图像,还可以得到测绘场景的三维图像,如

图 1.5 所示。三维图像形成,从机理上可以分成真实孔径和干涉成像两大类。真实孔径的方法是利用面阵或十字阵得到针状波束,获取二维空间高分辨率;再加上距离维分辨率,得到三维高分辨率。干涉成像不需要面阵,它与人双眼的立体视觉相似,只要有二个在待测量维空间分隔(即高度方向分隔)的天线或基阵即可,但与针状波束成像不同,干涉成像只是高度的测量值,而没有三维分辨能力,因此是伪三维的。



(a) 面阵声纳得到的三维声图

(b) 干涉合成孔径雷达得到的地形图

图 1.5 面阵声纳和干涉合成孔径雷达成像示例

目标识别是利用目标回波特性的差异,对目标的类型、敌我属性进行判断。回波差异表现在回波时域、频域、时频域、极化域和其他变换域的差异。敌我属性还可以采用二次雷达应答来识别。目标成像是目标类型识别的有效技术手段。

1.1.4 雷达与声纳工作波段划分

1. 雷达的工作频段

最早用于搜索雷达的电磁波波长为 23cm,这一波段被定义为 L 波段(英文 Long 的字头),后来这一波段的中心波长变为 22cm。当波长为 10cm 的电磁波被使用后,其波段被定义为 S 波段(英文 Short 的字头,意为比原有波长短的电磁波)。

在主要使用 3cm 电磁波的火控雷达出现后,3cm 波长的电磁波被称为 X 波段,因为 X 代表坐标上的某点。

为了结合 X 波段和 S 波段的优点,逐渐出现了使用中心波长为 5cm 的雷达,该波段被称为 C 波段(C 即 Compromise,英文“结合”一词的字头)。

在英国人之后,德国人也开始独立开发自己的雷达,他们选择 1.5cm 作为自己雷达的中心波长。这一波长的电磁波被称为 K 波段(K 即 Kurtz,德文中“短”的字头)。

最后,由于最早的雷达使用的是米波,这一波段被称为 P 波段(P 为 Previous 的缩写,即英文“以往”的字头)。

最初的代码(如 P、L、S、X 和 K)是在第二次世界大战期间为保密而引入的。尽管后来不再需要保密,但这些代码仍沿用至今。由于雷达使用了新的频段,其他的字符是后来增加的,其中 UHF 代替了 P 波段,P 波段不再使用。按国际电信协会(ITU)关于频段的划分,它作为一种标准已被电气和电子工程师协会(IEEE)正式接受,并被美国国防部认可。雷达工作频段的划分参见表 1.1。

国际电信联盟(ITU)为无线电定位(雷达)指定了特定的频段。这些频段列于表 1.1 的第三列。它们适用于包括北美、南美在内的 ITU 第 II 区。其他两个区的划分略有不同。例如,

尽管 L 波段如表 1.1 的第二列所示,它的范围为 1000~2000MHz,实际上,L 波段雷达的工作频率均在国际电信联盟指定的 1215~1400MHz 的范围内。

表 1.1 雷达工作频段划分一览表

| 波段名称 | 频率范围 | 据国际电信联盟的规定 II 区的雷达频段 |
|----------------|----------------|--|
| HF | 3~30 MHz | |
| VHF | 30~300 MHz | 138~144 MHz 216~225 MHz |
| UHF/P (A/B) | 300~1000 MHz | 420~450 MHz 890~942 MHz |
| L(C/D) | 1000~2000 MHz | 1215~1400 MHz |
| S(E/F) | 2000~4000 MHz | 2300~2500 MHz 2700~3700 MHz |
| C(G/H) | 4000~8000 MHz | 5250~5925 MHz |
| X(I/J) | 8000~12000 MHz | 8500~10 680 MHz |
| Ku | 12.0~18 GHz | 13.4~14.0 GHz 15.7~17.7 GHz |
| K | 18~27 GHz | 24.05~24.25 GHz |
| Ka | 27~40 GHz | 33.4~36.0 GHz |
| V | 40~75 GHz | 59~64 GHz |
| W | 75~110 GHz | 76~81 GHz 92~100 GHz |
| 毫米波 | 110~300 GHz | 126~142 GHz 144~149 GHz 231~235 GHz 238~248 GHz |

雷达的工作频率主要由天线的尺寸、传播的途径、目标回波的强弱、传播的衰减、多普勒频率和距离分辨率等因素决定。

雷达工作频率越低,天线尺寸越大。因此,米波雷达只能用作地面雷达。有限空间的雷达(如机载雷达),一般只能采用厘米波或更短波长工作。电磁波的传播途径有:沿地面传播(俗称地波)、电离层反射传播(俗称天波)直线传播和曲线传播(即大气波导)。我们身边的收音机短波就是依靠电离层传播。直线传播的电磁波就像光传播一样,这是绝大部分雷达使用的传播方式。对于一般的目标,其回波的强弱随波长增大而减小,但对于隐身目标米波波段的回波反而会增强。随着波长的缩短,电磁波的云雨衰减会迅速增大。多普勒频率与载频成正比,如果希望利用多普勒效应检测目标或测速,那么采用频率高的电磁波较为合适。采用米波检测动目标就非常困难了。如果要提高雷达的距离分辨率,就必须提高发射信号带宽。提高带宽可以采用提高发射系统的技术水平,降低 Q 值。而发射系统的 Q 值(中心频率与带宽之比)一般难以提高,如果希望提高带宽,提高工作频率是一个不错的选择。

米波雷达的特点是天线十分庞大,但由于它可以沿地面传播或电离层传播,探测距离不受地球半径的影响,因此探测距离可达上万千米,适合用于远程警戒雷达使用。米波雷达可以探测隐身目标和难以被反辐射导弹攻击的优点,但缺点是天波和地波雷达的天线太庞大、造价高,容易被侦察和打击。UHF 波段的米波雷达可以用于战术预警。

分米波多用于警戒雷达,厘米波一般用于高精度火控雷达和机载火控雷达。毫米波大气衰减大,一般只能用于近程,但有数个衰减小的窗口可供挑选使用。毫米波器件体积小、重量轻,绝对带宽大,美国无人机使用的 Mini SAR 就是采用的毫米波,其成像分辨率高达厘米量级。

随着超视距雷达和激光雷达的出现,新波段的开辟,雷达采用的工作波长已扩展到从大于 166m 的短波至小于 10^{-7} m 的紫外线光谱。

2. 声呐的工作频段

声呐的工作频段没有严格的定义和界限,但根据使用情况大致可以分成: 10Hz~1kHz, 500Hz~10kHz, 10kHz~100kHz 和 100kHz 以上 4 个频段。

选择声呐工作频段所考虑的因素与雷达相似,但更为复杂。首先,考虑的是声波传播的衰减。海洋声学吸收主要原因是由于硫酸镁的离子弛豫吸收,声波在海水中的衰减大约与频率的二分之三次方成正比;此外还受到海底底质和声速剖面(声速沿深度分布)的影响。其次,考虑的是目标特性。对于被动声呐,目标的线谱一般在 300Hz 以下,而线谱信噪比高且线谱检测是相干处理,处理增益高;同时不同的目标有不同的线谱,可以用于目标识别。对于主动声呐,潜艇对主动声呐的隐身,主要依靠敷消声瓦(简称敷瓦)技术。但敷消声瓦在低频(1kHz 以下)很难奏效。其三,还需要考虑海洋背景噪声。一般来说,低频段海洋噪声高,但到 500kHz 以后,又需要考虑海洋分子热运动噪声。

远距离水声探测一般选择 10Hz~1kHz 的工作频率,但为了保证足够的空间增益和方位的测量精度,声基阵就会很长,因此出现了舷侧阵声呐、拖曳线列阵(简称拖线阵)声呐和固定式线阵声呐,还出现了主动拖线阵声呐。水下短基线定位、鱼雷自导频率多选择在 30kHz 左右。高分辨率图像声呐一般选择在 100kHz 以上。医用超声成像设备工作频段多在 1MHz 以上。图 1.6 给出了各种声呐工作频率大致的范围。

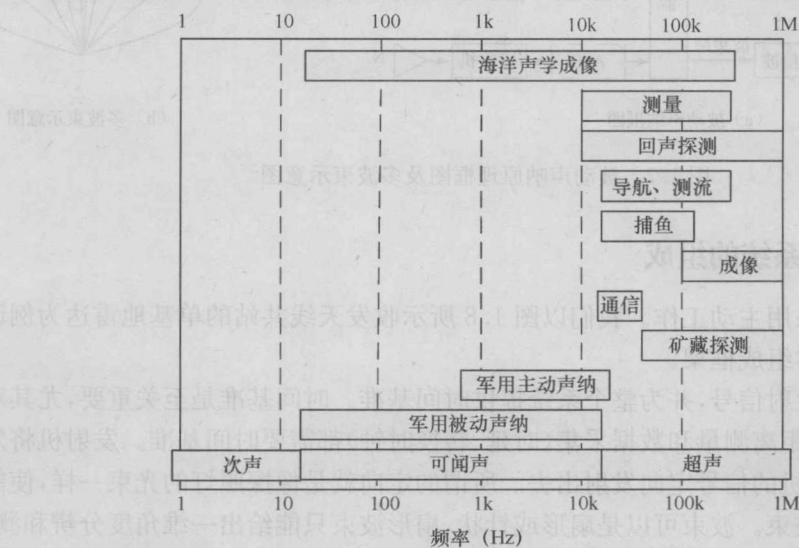


图 1.6 各种声呐工作的频率范围