



国防特色学术专著·电子科学与技术

# 雷达对抗工程

LEIDA DUIKANG GONGCHENG

唐永年 编著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社  
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色学术专著·电子科学与技术

# 雷达对抗工程

唐永年 编著

**北京航空航天大学出版社**

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社  
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

## 内 容 简 介

本书论述了雷达对抗工程的基本原理、设计方法,同时还介绍了雷达对抗工程的各种应用。主要内容包括:雷达系统概述、雷达对抗系统、雷达侦察接收机、雷达侦察测频、雷达侦察测向、雷达侦察信号处理、雷达干扰资源、数字化技术在雷达对抗系统中的应用和雷达对抗系统的电磁兼容。

本书可供从事电子信息对抗、雷达等专业工作的科技人员,以及高等院校电子信息对抗和信息安全等专业的师生使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

雷达对抗工程 / 唐永年编著. -- 北京 : 北京航空航天大学出版社, 2012. 6

ISBN 978 - 7 - 5124 - 0808 - 1

I. ①雷… II. ①唐… III. ①雷达对抗 IV.

①TN974

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 094185 号

版权所有,侵权必究。

## 雷达对抗工程

唐永年 编著

责任编辑 刘晓明

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×1 092 1/16 印张:25 字数:640 千字

2012 年 6 月第 1 版 2012 年 6 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978 - 7 - 5124 - 0808 - 1 定价:79.00 元

---

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

# 前 言

电子对抗是一个蓬勃发展的领域,特别是在现代战争的新形势下,需求牵引技术不断发展,而雷达对抗工程是高科技装备发展必须涉及的课题。

作者在电子对抗领域积累了四十多年的工作经验,在现代雷达对抗工程的基础上,概括总结了雷达对抗系统的基本原理及设计方法,集成此书。主要内容包括:雷达系统概述、雷达对抗系统、雷达侦察接收机、雷达侦察测频、雷达侦察测向、雷达侦察信号处理、雷达干扰资源、数字化技术在雷达对抗系统中的应用、雷达对抗系统的电磁兼容。

本书的基本特点是:强化专业术语的解释,构建适用的数理模型,进行严谨的分析并给出综合的结论,解读专业技术特点,提出工程设计方法,指出工程技术上的注意事项。

期望读者能借助本书启发灵感,更期望读者能突破本书,开创科技工作的新局面。

任何一项技术都有它的发展过程。任何一项技术都有它的优点、缺点,并在发扬优点、克服缺点中不断完善。在构建雷达对抗系统时,应用现有技术、适量引用创新技术,应该是最佳的选择。

在本书的编写过程中,得到了西南电子设备研究所及电子信息控制重点实验室相关领导的关心和支持。电子科技大学陈天祺教授和电子信息控制重点实验室胡来招博士、吕连元研究员、李焱研究员、顾杰博士、方剑博士、刘永红研究员对书稿提出了大量宝贵的建议,给予了极大的帮助和支持,在此,向他们表示衷心的感谢。

书中难免有错误及不当之处,望读者批评指正。

唐永年

2012年3月于成都

电子信息控制重点实验室

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第 1 章 雷达系统概述                    | 1  |
| 1.1 频段划分                        | 1  |
| 1.2 雷达分类                        | 2  |
| 1.3 雷达最大作用距离                    | 2  |
| 1.3.1 目标截面积                     | 3  |
| 1.3.2 识别系数                      | 3  |
| 1.3.3 最大作用距离                    | 4  |
| 1.3.4 视 距                       | 9  |
| 1.3.5 地物与海面杂波反射的影响              | 10 |
| 1.3.6 大气衰减的影响                   | 10 |
| 第 2 章 雷达对抗系统                    | 12 |
| 2.1 雷达对抗系统的组成                   | 13 |
| 2.2 雷达信号分类                      | 15 |
| 2.2.1 脉内调制及脉间相参分类               | 15 |
| 2.2.2 天线扫描信号分类                  | 17 |
| 2.2.3 天线极化分类                    | 18 |
| 2.3 雷达对抗天线                      | 18 |
| 2.3.1 基本天线                      | 19 |
| 2.3.2 透镜馈电多波束天线                 | 22 |
| 2.3.3 巴特勒阵馈电多波束天线               | 25 |
| 2.3.4 巴特勒阵馈电空间馈电天线              | 29 |
| 2.3.5 消除窄波束测向天线副瓣接收信号的方法        | 31 |
| 2.3.6 提高使用全向天线的测频系统灵敏度的方法       | 32 |
| 2.4 搜索式侦察系统的信号截获概率及平均截获时间       | 34 |
| 2.4.1 搜索式侦察系统分类                 | 35 |
| 2.4.2 雷达天线照射                    | 38 |
| 2.4.3 侦察系统的驻留时间                 | 39 |
| 2.4.4 中长驻留时间模式的搜索及信号截获概率        | 40 |
| 2.4.5 两个窗函数波形的关联特性              | 43 |
| 2.4.6 中长驻留时间模式侦察系统的平均截获时间       | 56 |
| 2.4.7 提高截获概率、缩短搜索周期、缩短平均截获时间的方法 | 59 |
| 2.5 雷达侦察系统的灵敏度                  | 60 |

|            |                  |           |
|------------|------------------|-----------|
| 2.5.1      | 侦察接收机的灵敏度        | 60        |
| 2.5.2      | 侦察系统的空间功率密度灵敏度   | 61        |
| 2.5.3      | 侦察系统的等效接收灵敏度     | 62        |
| 2.6        | 雷达侦察系统的最大侦察距离    | 63        |
| 2.6.1      | 理想的最大侦察距离        | 63        |
| 2.6.2      | 雷达侦察系统最大侦察距离的优势  | 64        |
| 2.6.3      | 视 距              | 64        |
| 2.6.4      | 地物和海面杂波反射的影响     | 65        |
| 2.6.5      | 大气衰减的影响          | 65        |
| 2.7        | 雷达干扰系统的干扰方式及干扰样式 | 65        |
| 2.7.1      | 压制干扰方式           | 66        |
| 2.7.2      | 欺骗干扰方式           | 69        |
| 2.8        | 雷达干扰系统的最小干扰距离    | 77        |
| 2.8.1      | 自卫干扰及支援干扰        | 78        |
| 2.8.2      | 干扰系统的等效辐射功率      | 79        |
| 2.8.3      | 压制系数             | 79        |
| 2.8.4      | 压制干扰的最小干扰距离      | 80        |
| 2.8.5      | 欺骗干扰的最小干扰距离      | 83        |
| 2.8.6      | 分布式雷达干扰          | 83        |
| 2.9        | 雷达干扰系统与雷达系统之间的对抗 | 83        |
| 2.10       | 综合电子战系统          | 84        |
| <b>第3章</b> | <b>雷达侦察接收机</b>   | <b>85</b> |
| 3.1        | 雷达侦察接收机的分类       | 85        |
| 3.1.1      | 按用途分类            | 85        |
| 3.1.2      | 按搜索分类            | 85        |
| 3.1.3      | 按采样频率分类          | 86        |
| 3.1.4      | 按增益分类            | 86        |
| 3.1.5      | 按频率范围分类          | 86        |
| 3.1.6      | 按实时频率带宽分类        | 86        |
| 3.1.7      | 按采样同步分类          | 87        |
| 3.2        | 射频中频接收机的信号及噪声    | 87        |
| 3.3        | 检波器              | 87        |
| 3.3.1      | 检波管物理模型          | 87        |
| 3.3.2      | 检波器物理模型          | 89        |
| 3.3.3      | 检波器的传输特性         | 89        |
| 3.4        | 检波器的信号及噪声        | 91        |
| 3.4.1      | 输出信号及输出噪声的直流分量   | 91        |

|        |                                 |     |
|--------|---------------------------------|-----|
| 3.4.2  | 由检波器及视频放大器热噪声产生的输出噪声            | 92  |
| 3.4.3  | 信号及噪声通过平方律检波器                   | 92  |
| 3.4.4  | 由射频中频放大器热噪声产生的输出起伏噪声            | 97  |
| 3.4.5  | 射频中频接收机临界增益                     | 98  |
| 3.4.6  | 输出总起伏噪声                         | 99  |
| 3.5    | 视频放大器的输出信号及噪声                   | 99  |
| 3.5.1  | 输出信号及输出噪声的直流分量                  | 100 |
| 3.5.2  | 输出起伏噪声                          | 100 |
| 3.6    | 检波器的输出信号及噪声的概率密度                | 101 |
| 3.6.1  | 中低增益接收机的输出信号及噪声的概率密度            | 101 |
| 3.6.2  | $\chi^2$ 概率密度及非中心 $\chi^2$ 概率密度 | 101 |
| 3.6.3  | 高增益接收机的输出信号及噪声的概率密度             | 104 |
| 3.7    | 检波式接收机的信号及噪声的检测                 | 108 |
| 3.7.1  | 虚警概率及检测门限                       | 108 |
| 3.7.2  | 平均虚警频率                          | 111 |
| 3.7.3  | 发现概率及视频最小可测信号电平                 | 112 |
| 3.8    | 检波式接收机灵敏度                       | 118 |
| 3.8.1  | 输入最小可测信号电平及接收机灵敏度的计算过程          | 119 |
| 3.8.2  | 中低增益接收机灵敏度的简捷算法                 | 121 |
| 3.8.3  | 高增益接收机灵敏度的简捷算法                  | 122 |
| 3.8.4  | 接收机灵敏度与接收机增益的关系                 | 125 |
| 3.8.5  | 高增益接收机灵敏度与接收机带宽的关系              | 126 |
| 3.8.6  | 接收机检测过渡区                        | 127 |
| 3.8.7  | 接收机切线灵敏度                        | 127 |
| 3.8.8  | 放大器饱和对接收机灵敏度的影响                 | 128 |
| 3.8.9  | 平方律接收机、线性律接收机、对数律接收机检测性能的比较     | 128 |
| 3.9    | 检波式接收机的信号检测电路                   | 129 |
| 3.9.1  | 检波器的直流偏置电压及输出噪声平均电压的温度特性        | 129 |
| 3.9.2  | 隔直流电容检测电路对信号检测的不利影响及抑制措施        | 130 |
| 3.9.3  | 直接耦合检测电路对信号检测的不利影响及抑制措施         | 132 |
| 3.9.4  | 弱小信号状态检测脉冲分裂对信号检测的不利影响及抑制措施     | 133 |
| 3.10   | 离散傅里叶变换                         | 133 |
| 3.10.1 | 离散傅里叶变换的特性                      | 134 |
| 3.10.2 | 离散傅里叶变换与傅里叶级数之间的关系              | 135 |
| 3.10.3 | 离散傅里叶变换与傅里叶变换之间的关系              | 138 |
| 3.11   | 数字化接收机的采样器及离散傅里叶变换              | 138 |
| 3.11.1 | 数字化接收机采样器的输入-输出特性               | 139 |
| 3.11.2 | 数字化接收机的离散傅里叶变换                  | 141 |



|            |                          |            |
|------------|--------------------------|------------|
| 3.11.3     | 数字化接收机的离散傅里叶变换的特性        | 142        |
| 3.11.4     | 采样器的信号及噪声                | 146        |
| 3.11.5     | 数字化接收机高增益的必要性            | 153        |
| 3.12       | 雷达信号及离散傅里叶变换             | 154        |
| 3.12.1     | 常规雷达信号及离散傅里叶变换           | 154        |
| 3.12.2     | 线性调频脉冲压缩雷达信号及离散傅里叶变换     | 155        |
| 3.12.3     | 动目标显示雷达信号及离散傅里叶变换        | 157        |
| 3.12.4     | 高重频脉冲多普勒雷达信号及离散傅里叶变换     | 157        |
| 3.12.5     | 调频连续波雷达信号及离散傅里叶变换        | 160        |
| 3.13       | 数字化接收机输出信号及噪声频谱幅度的概率密度   | 162        |
| 3.13.1     | 无信号状态输出噪声频谱幅度的概率密度       | 162        |
| 3.13.2     | 有信号状态输出信号及噪声频谱幅度的概率密度    | 162        |
| 3.14       | 数字化接收机信号及噪声的检测           | 163        |
| 3.14.1     | 虚警概率                     | 163        |
| 3.14.2     | 平均虚警频率                   | 164        |
| 3.14.3     | 频率单元内的发现概率及最小可测信号电平      | 165        |
| 3.15       | 高增益数字化接收机的灵敏度            | 167        |
| 3.15.1     | 高增益接收机灵敏度的简捷算法及识别系数的图解方法 | 167        |
| 3.15.2     | 高增益接收机的灵敏度与接收机参数的关系      | 169        |
| 3.15.3     | 数字化接收机的检测过渡区             | 169        |
| <b>第4章</b> | <b>雷达侦察测频</b>            | <b>170</b> |
| 4.1        | 测频分类                     | 170        |
| 4.2        | 测频天线                     | 170        |
| 4.3        | 超外差接收机及其测频               | 170        |
| 4.3.1      | 超外差接收机的组成及变频原理           | 171        |
| 4.3.2      | 混频器产生的中频虚假信号             | 176        |
| 4.3.3      | 混频器产生的中频虚假信号的不利影响及抑制措施   | 181        |
| 4.3.4      | 超外差接收机测频                 | 182        |
| 4.4        | 瞬时测频接收机及其测频              | 184        |
| 4.4.1      | 延时鉴相组合的测频                | 185        |
| 4.4.2      | IFM接收机的组成                | 194        |
| 4.4.3      | 多延时鉴相组合的解模糊              | 195        |
| 4.4.4      | 测频系统                     | 199        |
| 4.4.5      | 多延时鉴相组合的相位对准             | 203        |
| 4.4.6      | 同时到达的小信号对大信号测频的影响        | 203        |
| 4.5        | 信道化接收机及其测频               | 205        |
| 4.5.1      | 信道化接收机的组成                | 206        |



|            |                            |            |
|------------|----------------------------|------------|
| 4.5.2      | 声表面波滤波器组 .....             | 207        |
| 4.5.3      | 信道化接收机精测频 .....            | 209        |
| <b>第5章</b> | <b>雷达侦察测向 .....</b>        | <b>212</b> |
| 5.1        | 测向分类 .....                 | 212        |
| 5.2        | 测向天线 .....                 | 213        |
| 5.3        | 多波束内插比幅测向 .....            | 213        |
| 5.3.1      | 设备的组成 .....                | 214        |
| 5.3.2      | 测向天线 .....                 | 215        |
| 5.3.3      | 测向接收机 .....                | 215        |
| 5.3.4      | 幅度比大测向 .....               | 216        |
| 5.3.5      | 测向信道选择 .....               | 217        |
| 5.3.6      | 幅度比大测向—信道选择后的信号可能方位角 ..... | 218        |
| 5.3.7      | 内插比幅测向 .....               | 219        |
| 5.3.8      | 内插比幅测向误差分析 .....           | 220        |
| 5.4        | 空间谱测向 .....                | 221        |
| 5.4.1      | 空间谱 .....                  | 221        |
| 5.4.2      | 实数函数空间谱测向 .....            | 222        |
| 5.4.3      | 复数函数空间谱测向 .....            | 229        |
| 5.5        | 干涉仪测向 .....                | 237        |
| 5.5.1      | 设备的组成 .....                | 238        |
| 5.5.2      | 测向天线 .....                 | 238        |
| 5.5.3      | 测向接收机 .....                | 239        |
| 5.5.4      | 单基线干涉仪测向原理 .....           | 239        |
| 5.5.5      | 单基线干涉仪测向误差分析 .....         | 241        |
| 5.5.6      | 多基线干涉仪测向原理 .....           | 241        |
| 5.5.7      | 多基线干涉仪测向解模糊 .....          | 243        |
| 5.5.8      | 多基线干涉仪测向误差分析 .....         | 245        |
| 5.6        | 短基线时差测向 .....              | 245        |
| 5.6.1      | 设备的组成 .....                | 247        |
| 5.6.2      | 测向天线 .....                 | 247        |
| 5.6.3      | 测向接收机 .....                | 248        |
| 5.6.4      | 短基线时差测向原理 .....            | 248        |
| 5.6.5      | 误差分析 .....                 | 249        |
| 5.7        | 单脉冲测向 .....                | 249        |
| 5.7.1      | 幅度和差单脉冲测向 .....            | 250        |
| 5.7.2      | 相位和差单脉冲测向 .....            | 256        |
| 5.7.3      | 幅度相位和差单脉冲测向 .....          | 261        |

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 5.8 最大信号测向 .....                       | 262 |
| 5.8.1 设备的组成 .....                      | 263 |
| 5.8.2 最大信号测向原理 .....                   | 263 |
| 5.8.3 误差分析 .....                       | 266 |
| 5.9 定位曲面 .....                         | 266 |
| <b>第 6 章 雷达侦察信号处理</b> .....            | 270 |
| 6.1 脉冲描述字的产生 .....                     | 270 |
| 6.1.1 脉冲宽度测量 .....                     | 271 |
| 6.1.2 脉冲到达时间测量 .....                   | 272 |
| 6.1.3 脉冲描述字的产生 .....                   | 272 |
| 6.2 雷达信号分选 .....                       | 274 |
| 6.2.1 硬件信号分选 .....                     | 278 |
| 6.2.2 软件信号分选 .....                     | 283 |
| 6.3 雷达识别 .....                         | 290 |
| 6.3.1 雷达信号类型、特征及参数 .....               | 292 |
| 6.3.2 雷达信号数据库 .....                    | 293 |
| 6.3.3 雷达信号态势数据 .....                   | 294 |
| 6.3.4 已知雷达识别方法 .....                   | 295 |
| 6.3.5 未知雷达识别方法 .....                   | 297 |
| 6.4 两部雷达信号脉冲序列的同步关系参数特性 .....          | 304 |
| 6.4.1 固定脉冲周期雷达 $B$ 与固定脉冲周期雷达 $A$ ..... | 305 |
| 6.4.2 固定脉冲周期雷达 $B$ 与参差脉冲周期雷达 $A$ ..... | 307 |
| 6.4.3 固定脉冲周期雷达 $B$ 与组变脉冲周期雷达 $A$ ..... | 310 |
| 6.5 雷达信号漏批及增批 .....                    | 312 |
| 6.5.1 雷达信号脉冲丢失及脉冲错码 .....              | 313 |
| 6.5.2 由雷达信号脉冲丢失及错码产生的雷达信号漏批及增批 .....   | 316 |
| <b>第 7 章 雷达干扰资源</b> .....              | 320 |
| 7.1 雷达干扰源 .....                        | 320 |
| 7.1.1 与雷达信号非相参的干扰源 .....               | 320 |
| 7.1.2 与雷达信号相参的干扰源 .....                | 325 |
| 7.2 调制 .....                           | 335 |
| 7.2.1 调频 .....                         | 336 |
| 7.2.2 调相 .....                         | 338 |
| 7.2.3 调幅 .....                         | 344 |
| 7.2.4 混频调制 .....                       | 345 |
| 7.3 调制器及混频调制器 .....                    | 347 |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 7.4 调制信号及产生器 .....                    | 348        |
| 7.5 变频器 .....                         | 348        |
| 7.6 数字化干扰源 .....                      | 348        |
| 7.7 雷达干扰发射资源 .....                    | 350        |
| 7.7.1 发射管 .....                       | 350        |
| 7.7.2 魔 T 功率合成发射装置 .....              | 351        |
| 7.7.3 同相馈电单波束发射装置 .....               | 352        |
| 7.7.4 非相参馈电单波束发射装置 .....              | 353        |
| 7.7.5 透镜馈电多波束发射装置 .....               | 354        |
| 7.7.6 巴特勒阵馈电多波束发射装置 .....             | 356        |
| 7.7.7 相控阵馈电发射装置 .....                 | 356        |
| 7.8 对雷达辐射源的角跟踪 .....                  | 358        |
| 7.8.1 角跟踪设备的组成 .....                  | 358        |
| 7.8.2 目标角速度估值及角度预测 .....              | 359        |
| 7.8.3 高精度测角 .....                     | 360        |
| 7.8.4 干扰天线稳定原理 .....                  | 361        |
| 7.9 雷达干扰管理 .....                      | 366        |
| 7.9.1 雷达干扰管理设备的组成 .....               | 367        |
| 7.9.2 雷达干扰指令的产生 .....                 | 367        |
| <b>第 8 章 数字化技术在雷达对抗系统中的应用 .....</b>   | <b>369</b> |
| 8.1 检波式准数字化接收机 .....                  | 369        |
| 8.2 数字式滤波器 .....                      | 370        |
| 8.3 数字式鉴相器 .....                      | 371        |
| 8.3.1 数字式复数信号产生器 .....                | 371        |
| 8.3.2 数字式鉴相器原理 .....                  | 371        |
| 8.4 数字式巴特勒阵馈电多波束设备 .....              | 372        |
| 8.4.1 形成 $N$ 天线 $N$ 奇波束的离散傅里叶变换 ..... | 373        |
| 8.4.2 形成 $N$ 天线 $N$ 偶波束的离散傅里叶变换 ..... | 374        |
| 8.5 数字式巴特勒阵馈电空间谱设备 .....              | 374        |
| <b>第 9 章 雷达对抗系统的电磁兼容 .....</b>        | <b>376</b> |
| 9.1 雷达对抗系统的收发隔离技术 .....               | 376        |
| 9.1.1 改善空间收发隔离 .....                  | 376        |
| 9.1.2 频率兼容管理 .....                    | 377        |
| 9.1.3 收发分时管理 .....                    | 378        |
| 9.1.4 收发电平管理 .....                    | 378        |
| 9.1.5 多系统同步管理 .....                   | 378        |

---

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 9.1.6 发射静态噪声管理 .....   | 379 |
| 9.2 匿 影 .....          | 380 |
| 9.3 接收机的保护 .....       | 380 |
| 9.3.1 辐射信号的功率密度 .....  | 381 |
| 9.3.2 接收信号功率电平 .....   | 384 |
| 9.3.3 限幅保护器的保护功率 ..... | 384 |
| 9.3.4 保护接收机的其他措施 ..... | 385 |
| 参考文献 .....             | 387 |

# 第 1 章 雷达系统概述

雷达是利用电磁辐射探测物体目标(简称为雷达目标,或目标)的一种装置。在大多数现代武器系统中,雷达是一个关键的传感器。它在远距离、全天候环境中的工作能力是任何其他现有传感器所不能匹敌的。

本章从雷达对抗专业视角概述雷达系统。有关雷达系统的某些重要概念(如组成及工作原理、反侦察技术、抗干扰技术、目标截面积等)见参考文献[1]、[2]。

## 1.1 频段划分

雷达频段及电子对抗频段划分如表 1.1.1 所列。

表 1.1.1 雷达频段及电子对抗频段划分

| 雷达频段 <sup>①</sup> |    |                 | 电子对抗频段 <sup>②</sup> |                 |
|-------------------|----|-----------------|---------------------|-----------------|
| 频段名称              |    | 频率范围            | 频段名称                | 频率范围            |
| 高频(HF)(短波)        |    | 3~30 MHz        | A                   | 0~250 MHz       |
| 甚高频(VHF)(超短波)     |    | 30~300 MHz      |                     |                 |
| 特高频(UHF)(分米波)     |    | 300~1 000 MHz   | B                   | 250~500 MHz     |
|                   |    |                 | C                   | 500~1 000 MHz   |
| 特高频               | L  | 1 000~2 000 MHz | D                   | 1 000~2 000 MHz |
|                   | S  | 2 000~4 000 MHz | E                   | 2 000~3 000 MHz |
| 超高频<br>(厘米波)      | C  | 4 000~8 000 MHz | F                   | 3 000~4 000 MHz |
|                   |    |                 | G                   | 4 000~6 000 MHz |
|                   | X  | 8~12 GHz        | H                   | 6 000~8 000 MHz |
|                   |    |                 | I                   | 8~10 GHz        |
|                   | Ku | 12~18 GHz       | J                   | 10~20 GHz       |
|                   | K  | 18~27 GHz       |                     |                 |
| 极高频<br>(毫米波)      | Ka | 27~40 GHz       | K                   | 20~40 GHz       |
|                   | mm | 40~300 GHz      | L                   | 40~60 GHz       |
|                   |    |                 | M                   | 60~100 GHz      |

① IEEE 521—1976,1976 年 11 月 30 日。

② AFR55—44(AR105—86,OPNA VINST 3430.9,MCO3430.1),1964 年 10 月 27 日。

## 1.2 雷达分类

按体制分类有：连续波雷达、动目标显示雷达、脉冲多普勒雷达、脉冲压缩雷达、相控阵雷达、合成孔径雷达、频率捷变雷达、频率分集雷达、超视距雷达、边扫描边跟踪雷达、双基地雷达、单脉冲雷达等。

按用途分类有：超远程预警雷达、警戒雷达、指挥引导雷达、炮瞄雷达、制导雷达、测高雷达、引信雷达、地形测绘雷达、导航雷达、交通管制雷达、弹道定位雷达等。

按安装平台分类有：机载雷达、舰载雷达、车载雷达、陆基雷达、炮弹载雷达、导弹载雷达、卫星载雷达等。

本节的主要参考资料为参考文献[1]。

## 1.3 雷达最大作用距离

本节所论述的雷达最大作用距离限于：特定的目标截面积；给定的虚警概率及发现概率的要求；由于接收机内部的热噪声所限制的雷达的最大探测距离。

虚警概率的典型值为  $1 \times 10^{-6}$ ，发现概率的典型值为 0.9。

除了接收机内部的热噪声之外，背景环境物体（包括：地物、海面、云、雾、雨等）所产生的杂波也会限制雷达的最大作用距离；接收与发射之间的隔离度（简称收发隔离度）也会限制雷达的最大作用距离。

假设在信号检测过程中，使用线性检波状态的检波器及视频放大器，对窄带过程包络进行检测。

假设对窄带噪声进行包络检测后，获得的包络（也称之为幅度）分布为瑞利分布。

假设对窄带信号加噪声进行包络检测后，获得的包络分布为莱斯分布。

为方便起见，将雷达系统中的接收检测设备的组成划分为五个部分：接收天线、前端无源电路、接收机、信号处理机、检测电路。它们之间形成六个界面端口（简称端口）：接收天线辐射输入端口、接收天线输出端口、接收机输入端口、接收机输出端口、信号处理机输出端口、检测电路输出端口，如图 1.3.1 所示。

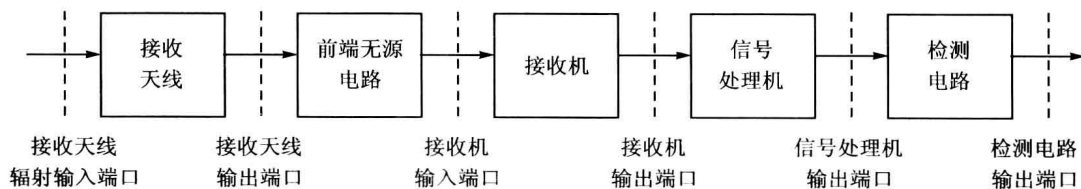


图 1.3.1 雷达接收设备的组成及端口

图 1.3.1 中的前端无源电路包括：馈线、滤波器、接收机保护器（或称之为限幅器）、耦合器等无源器件。接收机的第 1 级为低噪声射频放大器。

图 1.3.1 中的接收机包括：射频放大器、混频器、中频放大器。接收机的带宽是指该中频放大器的带宽，通常为几兆赫兹。

图 1.3.1 所示信号处理机中的信号处理,是指从接收机的热噪声中、从空间环境的杂波中提取目标回波的信号处理。

本节的主要参考资料为参考文献[1]第2章、[2]第2章。

### 1.3.1 目标截面积

目标截面积是指目标指向雷达接收天线散射电磁波强度的度量值,以等效面积表示。

目标截面积与许多因素有关:

- 截面积与物体材质。
- 对于复杂形状目标,不同视角对截面积的影响非常大;对于各视角的截面积取其平均,得到复杂形状目标的平均截面积。

雷达目标的平均截面积的参考值如表 1.3.1 所列。

表 1.3.1 雷达目标的平均截面积的参考值

| 目 标                 | 导 弹      | 歼击机    | 轰炸机    | 运输机    |
|---------------------|----------|--------|--------|--------|
| 平均截面积/ $\text{m}^2$ | 0.01~0.1 | 1~5    | 10~20  | 50     |
| 目 标                 | 潜艇的潜望塔   | 水面上的潜艇 | 快艇     | 小型渔船   |
| 平均截面积/ $\text{m}^2$ | 3~5      | 35~140 | 100    | 200    |
| 目 标                 | 护卫舰      | 驱逐舰    | 巡洋舰    | 大型运输舰  |
| 平均截面积/ $\text{m}^2$ | 5 000    | 10 000 | 20 000 | 40 000 |

### 1.3.2 识别系数

识别系数是指:在给定的虚警概率及发现概率的要求下,在检测端,信号电平与噪声电平的特定的比值。

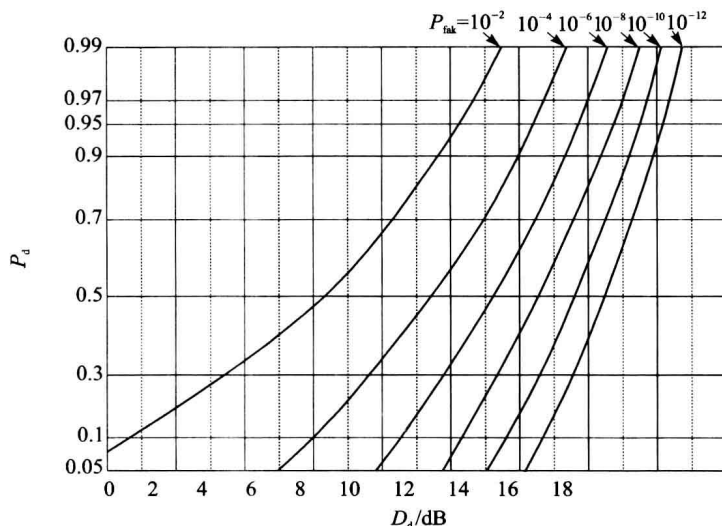
对于检波式接收机,检测端位于视频检测电路中。对于线性律检波,其特定比值为功率比。

对于给定的虚警概率及发现概率的要求,识别系数  $D_d$  (dB) 如表 1.3.2 所列、图 1.3.2 所示。

表 1.3.2 识别系数  $D_d$

| $D_d/\text{dB}$  |            | $P_{\text{dk}}$ |       |       |       |       |       |
|------------------|------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  |            | 0.05            | 0.1   | 0.5   | 0.9   | 0.95  | 0.99  |
| $P_{\text{tak}}$ | $10^{-2}$  | -2.06           | 0.61  | 6.12  | 9.40  | 10.14 | 11.37 |
|                  | $10^{-4}$  | 4.93            | 6.14  | 9.40  | 11.75 | 12.31 | 13.28 |
|                  | $10^{-6}$  | 7.86            | 8.73  | 11.24 | 13.18 | 13.66 | 14.49 |
|                  | $10^{-8}$  | 9.71            | 10.42 | 12.53 | 14.23 | 14.65 | 15.40 |
|                  | $10^{-10}$ | 11.07           | 11.67 | 13.53 | 15.05 | 15.44 | 16.12 |
|                  | $10^{-12}$ | 12.13           | 12.66 | 14.33 | 15.73 | 16.09 | 16.73 |



图 1.3.2 识别系数  $D_d$  曲线

### 1.3.3 最大作用距离

本小节论述理想情况下的雷达最大作用距离。理想情况是指在空间环境中,无其他物体遮蔽,无其他物体反射,并且忽略空间环境中大气衰减的状况。一般情况下,“最大作用距离”一词将表述理想情况下的最大作用距离。

通常,常规雷达、线性调频脉冲压缩雷达、合成孔径雷达的最大作用距离为几百千米,某些雷达有可能超过 1 000 km。

通常,动目标显示雷达、脉冲多普勒雷达的最大作用距离为几百千米。

由于调频连续波雷达的最大作用距离受到收发隔离度的限制,因此调频连续波雷达的最大作用距离不超过 100 km;如果只探测远距离目标,则其最大作用距离可超过 100 km。

#### 1. 常规雷达最大作用距离

常规雷达包括:固定频率固定脉冲重复周期(脉冲重复周期,简称为脉冲周期)雷达、变频率雷达、变脉冲周期雷达、变频率变脉冲周期雷达、同时多频率雷达等。

常规雷达普遍用于多种用途,安装于多种平台;常规雷达的信号处理采用视频的信号积累处理。

记  $\tau$  为雷达脉冲信号宽度,  $b$  为射频中频信号 -3 dB 带宽(简称为信号带宽),记  $b_{ms}$  为射频中频信号主频谱带宽。通常

$$b \approx 1/\tau \quad (1.3.1)$$

$$b_{ms} \approx 2/\tau \quad (1.3.2)$$

记  $B_r$  为接收机中频 -3 dB 带宽(简称为接收机带宽),  $B_v$  为接收机视频 -3 dB 带宽(简称为接收机视频带宽)。通常

$$B_r \geq b_{ms} \quad (1.3.3)$$

$$B_v \geq b_{ms}/2 \quad (1.3.4)$$

### (1) 无视频积累情况

记  $R_{\max}$  为无视频积累的常规雷达的最大作用距离,且

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t G_a}{L_t L_r S_{\text{rind}}} \frac{\lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3}} = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t G_a \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 L_t L_r F_r k T B_r D_d}} \quad (1.3.5)$$

式中,  $P_t$  为发射功率(对于脉冲雷达是指脉冲发射功率),  $G_t$  为发射天线增益,  $L_t$  为发射馈线损耗;  $\lambda$  为信号波长,  $\sigma$  为雷达目标的平均截面积;  $L_r$  为接收馈线损耗,  $S_{\text{rind}}$  为接收机灵敏度,  $G_a$  为接收天线增益, 通常, 雷达发射及接收共用天线,  $G_a = G_t$ ;  $F_r$  为接收机噪声系数,  $k$  为玻耳兹曼常数,  $T$  为热力学温度,  $B_r$  为接收机带宽,  $D_d$  为检测端的识别系数。

记  $\text{ERP}_t$  为等效辐射功率,  $S_{\text{ed}}$  为等效灵敏度, 则

$$\text{ERP}_t = P_t G_t / L_t \quad (1.3.6)$$

$$S_{\text{ed}} = L_r S_{\text{rind}} / G_a \quad (1.3.7)$$

$$S_{\text{rind}} = F_r k T B_r D_d \quad (1.3.8)$$

于是

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{\text{ERP}_t}{S_{\text{ed}}} \frac{\lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3}} \quad (1.3.9)$$

### (2) 有视频积累情况

记  $R_{\text{va}, \max}$  为有视频积累的常规雷达的最大作用距离, 且

$$R_{\text{va}, \max} = \sqrt[4]{G_{\text{va}}} \sqrt[4]{\frac{P_t G_t^2}{L_t L_r S_{\text{rind}}} \frac{\lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3}} = \sqrt[4]{G_{\text{va}}} \sqrt[4]{\frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 L_t L_r F_r k T B_r D_d}} \quad (1.3.10)$$

$$R_{\text{va}, \max} = \sqrt[4]{G_{\text{va}}} \sqrt[4]{\frac{\text{ERP}_t}{S_{\text{ed}}} \frac{\lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3}} \quad (1.3.11)$$

式中,  $G_{\text{va}}$  为视频积累处理增益。记  $\tau_w$  为雷达天线  $-3$  dB 波束宽度扫掠过目标(物体目标)的照射时间,  $N_w$  为照射时间内所发射的脉冲信号数, PRT 为雷达信号的脉冲周期(或平均脉冲周期), 则

$$G_{\text{va}} = \sqrt{N_w} \quad (1.3.12)$$

$$N_w = \tau_w / \text{PRT} \quad (1.3.13)$$

通常,  $P_t$  的范围为几千瓦至几兆瓦,  $G_t$  的典型值为 30 dB,  $\lambda$  的范围为几米至几毫米,  $\sigma$  的参考值见表 1.3.1,  $L_t$  的范围为 0~2 dB,  $L_r$  的范围为 0~3 dB,  $F_r$  的典型值为 3~5 dB,  $kT$  的典型值为  $-114$  dBm/MHz,  $B_r$  的范围为 1~20 MHz,  $D_d$  的典型值为 13 dB。

$N_w$  的典型值为 4~16, 于是,  $G_{\text{va}}$  的典型值为 2~4 (3~6 dB)。

## 2. 线性调频脉冲压缩雷达的最大作用距离

线性调频脉冲压缩(PC)雷达的主要作用是: 提高距离分辨率, 提高雷达最大作用距离。

线性调频脉冲压缩雷达的信号处理采用中频时域上的脉冲信号压缩处理。

记  $B$  为雷达信号线性调频范围, 且

$$b \approx B \quad (1.3.14)$$

$$b_{ms} \approx B \quad (1.3.15)$$

$$B_r \geq B \quad (1.3.16)$$