

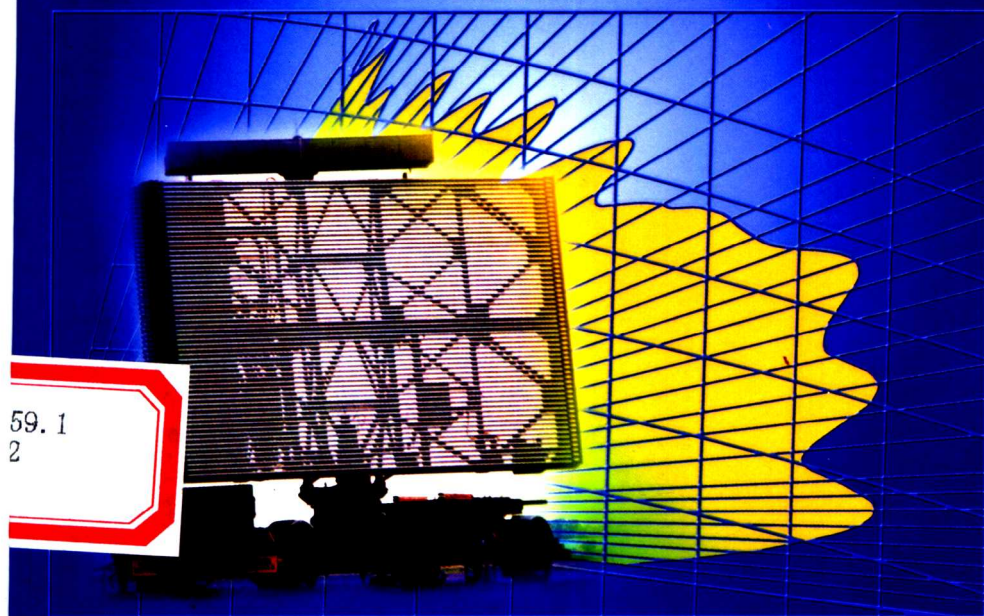
# 现代对空情报雷达

## Modern Air Surveillance Radar

贾玉贵 编著

National Defence Industry Press

<http://www.ndip.cn>



國防工業出版社

# 现代对空情报雷达

## Modern Air Surveillance Radar

贾玉贵 编著



国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

现代对空情报雷达/贾玉贵编著. —北京:国防工业出版社, 2004. 4

ISBN 7-118-03424-X

I. 现... II. 贾... III. 地面雷达—技术  
IV. TN959.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 011995 号

**国防工业出版社** 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码: 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

开本 850×1168 1/32 印张 5 1/4 134 千字

2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月北京第 1 次印刷

印数: 1—4000 册 定价: 15.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

# 前 言

对空情报雷达是用于搜索、监视与识别空中目标并确定其坐标和运动参数的雷达,也称对空搜索雷达。它所提供的情报,主要用于对空警戒、引导歼击机截击敌方航空兵器 and 为防空武器系统指示目标,也用于保证飞行训练和飞行管制,是现代战争中获取空中目标情报的重要电子技术装备。随着现代战争的需求和电子技术的进步,20 世纪末以全相参、相控阵、全固态、脉冲压缩等技术为基础发展了新一代对空情报雷达。

在浩如烟海的雷达技术和资料中,本书仅从几个侧面提供了学习和研究的捷径。本书第一章简要介绍了现代对空情报雷达的主要技术和雷达“四抗”(雷达抗电子侦察和抗电子干扰技术,雷达抗反辐射武器攻击技术,雷达反隐身目标技术,雷达反低空、超低空突袭技术)的措施;第二章比较系统地介绍了当代国外对空情报雷达的类型、体制、性能和发展方向;第三章介绍了对空情报雷达的关键参数测试方法和雷达检验飞行技术,涉及到较多在一般资料中很难找到的实用数学推证。

作者期望本书能对雷达装备的发展有一定的启迪作用,使得对雷达技术比较生疏的读者了解对空情报雷达的发展动态;对雷达技术比较熟悉的读者也能从中受到启发。书中还给出一些对雷达验收所需的关键公式和图表。本书适用于雷达部队、雷达厂所以及大专院校雷达专业的广大读者。

编著本书的过程得到了作者所在单位及上级领导机关的大力支持,部分编写内容借鉴了郑乃森、李耀元和周苑等同志撰写的材

#### IV

料,王被德、张惜春、屠国纶和沈齐等同志审阅了全书,并提出了许多很好的意见,张莉芳同志绘制了部分插图,国防工业出版社王晓光编审为本书的编辑出版做了大量工作,在此一并表示感谢。由于作者水平有限,书中不妥之处,敬请读者提出宝贵意见。

作者 金 志 宏

2004 年 1 月

## 内 容 简 介

本书提供了快速学习和研究现代对空情报雷达的途径。

全书共三章。第一章简要介绍了现代对空情报雷达的分类、命名、主要技术及“四抗”措施；第二章比较系统地介绍了当代国外对空情报雷达的类型、体制、性能和发展方向；第三章介绍了对空情报雷达的关键参数测试方法和雷达检验飞行技术。

读者对象：研制或使用雷达设备的科技人员、现场操作人员，以及大专院校相关专业的师生。

# 目 录

## 第一章 现代对空情报雷达技术

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第一节 对空情报雷达的分类、命名和工作频段特点       |    |
| 简介                            | 1  |
| 一、对空情报雷达的分类                   | 1  |
| 二、对空情报雷达的命名                   | 2  |
| 三、对空情报雷达工作频段划分及地面雷达工作<br>频率特点 | 4  |
| 第二节 现代对空情报雷达技术介绍              | 7  |
| 一、全相参体制                       | 8  |
| 二、平面阵列天线技术                    | 9  |
| 三、脉冲压缩技术                      | 12 |
| 四、全固态发射机技术                    | 13 |
| 五、雷达信号处理技术                    | 15 |
| 六、雷达终端技术                      | 17 |
| 七、雷达组网技术                      | 20 |
| 第三节 现代对空情报雷达“四抗”技术介绍          | 21 |
| 一、雷达抗电子侦察和抗电子干扰技术             | 21 |
| 二、雷达抗反辐射武器攻击技术                | 30 |
| 三、雷达反隐身目标技术                   | 37 |
| 四、雷达反低空、超低空突袭技术               | 40 |

## 第二章 国外现代对空情报雷达分析

|               |    |
|---------------|----|
| 第一节 三坐标对空情报雷达 | 44 |
|---------------|----|

|                                        |            |
|----------------------------------------|------------|
| 一、对现代三坐标对空情报雷达的需求和三坐标<br>雷达的发展趋势 ..... | 44         |
| 二、三坐标雷达的技术体制及比较 .....                  | 46         |
| 三、国外典型三坐标雷达举例及评述 .....                 | 59         |
| <b>第二节 两坐标对空情报雷达 .....</b>             | <b>65</b>  |
| 一、两坐标对空情报雷达的用途和类型 .....                | 65         |
| 二、两坐标雷达的发展趋势 .....                     | 67         |
| 三、国外典型两坐标雷达举例及评述 .....                 | 72         |
| <b>第三节 无源雷达 .....</b>                  | <b>80</b>  |
| 一、无源雷达的用途和发展过程 .....                   | 80         |
| 二、无源雷达的类型和工作原理 .....                   | 82         |
| 三、国外无源雷达系统介绍 .....                     | 86         |
| <b>第四节 气球载雷达 .....</b>                 | <b>95</b>  |
| 一、气球载雷达的发展及特点 .....                    | 95         |
| 二、气球载雷达的组成和关键技术 .....                  | 100        |
| 三、国外典型气球载雷达的性能和发展展望 .....              | 103        |
| <b>第五节 天波超视距雷达 .....</b>               | <b>107</b> |
| 一、天波超视距雷达的工作原理和用途 .....                | 107        |
| 二、天波超视距雷达的关键技术 .....                   | 111        |
| 三、国外天波超视距雷达的发展情况和举例 .....              | 112        |
| <b>第六节 战略预警雷达 .....</b>                | <b>116</b> |
| 一、战略预警雷达的用途和特点 .....                   | 116        |
| 二、国外战略预警雷达的发展情况 .....                  | 117        |
| 三、国外典型战略预警雷达介绍 .....                   | 120        |

### 第三章 对空情报雷达的关键参数 测试和检飞试验技术

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| <b>第一节 对空情报雷达的关键参数测试技术 .....</b> | <b>123</b> |
| 一、雷达天线波瓣的测试 .....                | 123        |
| 二、雷达发射机稳定性的测试 .....              | 130        |



|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| <b>第二节 对空情报雷达检飞试验 .....</b>           | <b>135</b> |
| 一、检飞试验的组织与实施 .....                    | 136        |
| 二、威力检飞中架次选取的依据 .....                  | 137        |
| 三、测高精度检飞架次选取的依据和数据处理 .....            | 144        |
| 四、指数大气模型下雷达射线的高度、距离、仰角<br>关系的计算 ..... | 152        |
| <b>参考文献 .....</b>                     | <b>159</b> |

# 第一章 现代对空情报雷达技术

## 第一节 对空情报雷达的分类、命名 和工作频段特点简介

### 一、对空情报雷达的分类

雷达是利用电磁波探测目标的电子设备。雷达天线把发射机提供的电磁能量向空间某一方向辐射,处在此方向上的物体反射到达的电磁波,这些反射波载有该物体的信息并被雷达天线接收,送至雷达接收设备进行处理,获得目标至雷达的距离、距离变化率(径向速度)、方位、高度等信息并滤除无用信息,对目标进行探测。雷达是英文 RADAR(Radio Detection and Ranging)的音译,意为“无线电检测和测距”。雷达的主要优点是白天黑夜均能检测到远距离的较小目标的位置变化,因此是现代战争中必不可少的电子装备。

对空情报雷达是用来搜索、监视和识别空中目标的雷达。早期的空中目标以飞机为主。由于防空和防天的界限日益模糊和任务趋于统一,现代对空情报雷达也担负对导弹预警的任务。依据使用的侧重点不同,又可以分为对飞机目标探测和对导弹目标探测两大类或两种工作模式。

对飞机探测的雷达包括用于发现、粗略探测飞机目标坐标的警戒雷达和用于发现、精确探测飞机目标坐标,担负对战机引导作用的引导雷达。警戒与引导雷达又各有远、中、近程雷达之分。警戒雷达区分的标准是以对典型歼击机发现概率 50% 时,探测距离大于 400km、高度覆盖大于 35000m 为远程;探测距离大于 250km,

高度覆盖大于 25000m 为中程;探测距离大于 150km,高度覆盖大于 10000m 为近程。引导雷达区分的标准是对典型歼击机发现概率 80%时,探测距离大于 350km、高度覆盖大于 25000m 为远程;探测距离大于 250km、高度覆盖大于 20000m 为中程;低于上述指标者为近程(或低空)。

地基常规对飞机目标探测的雷达包括:能同时测量目标的距离、方位和高度的三坐标雷达,它适用于对大批量飞机目标的引导和监视;只能测量目标的距离和方位的两坐标雷达,它主要担负警戒任务,但精度比较高的两坐标雷达当配有测高雷达时,也可以担负少量飞机目标的引导任务;用于加强低空探测和补充的中低空雷达。

空基对飞机目标探测的雷达包括:用于预警指挥和强化低空探测的空中预警机雷达,加强低空探测的气球载雷达以及卫星载雷达。

此外还有一些特殊体制的雷达,如超视距雷达、无源雷达、双(多)基地雷达、二次雷达、对反辐射武器的告警雷达、外辐射源雷达等。某些光电探测系统则属于对空情报辅助探测装备,常与对空情报雷达配合使用。

对导弹探测的地面雷达包括:对中远程导弹探测的战略预警雷达、天波超视距雷达、对战术导弹探测的相控阵雷达、为地面拦截武器提供信息的目标指示雷达等。

## 二、对空情报雷达的命名

### (一) 国内规定

我国对空情报雷达型号的命名常在序号前面冠以“LLQ”字样。其中:第一个字母 L 为“雷达”拼音首字母;第二个字母 L 为“陆用”拼音首字母;第三个字母 Q 为“情报”拼音首字母。更详细的命名方法请参阅有关规定。

每一种雷达在研制中一般都有其厂(所)代号,严格说,只作为设计定型前使用,但是有的也沿用下来。我国出口型对空情报雷达

各有关单位常用“YLC - 数字”、“JY - 数字”、“REL - 数字”等表示。

## (二) 美军规定

美国军用电子设备(包括雷达)是根据美军规范 MIL - N - 13807C(ASG)来命名的。名称的英文字母部分由 AN、一条斜线和另外三个字母组成,后面是一短划线、一个数字和 A、B、C 等。其中,AN 表示军用;雷达常用的第一个字母表示设备装载位置,如 A——机载、F——固定式、M——地面移动式、P——便携式、T——地面可移动式等等;第二个字母表示设备种类,如 P——雷达、L——电子对抗设备、A——红外设备等;第三个字母表示设备用途,如 S——探测和/或测距与测向、Q——专用或兼用、D——测向和/或侦察、N——导航、R——接收/无源探测、T——发射等;短划线后面的数字表示设备序号;早期用 A、B、C 等表示派生型号,而新的变型改用(V)1,(V)2,(V)3,⋯表示。

如 AN/TPS - 59 表示美军的第 59 种地面可运输型雷达。

美国的空中交通管制雷达有一部分兼作军用对空情报雷达使用,这些雷达在作为空中交通管制雷达时使用了下列代号: ARSR——航线监视雷达; ASR——机场监视雷达; ASDE——机场地面探测设备; PAR——精密引导雷达。字母后面的数字表示雷达设备序号。空中交通管制雷达在兼作军用对空情报雷达时,另有一个按军用电子设备命名的名称。如 ARSR - 4,又名 AN/FPS - 130。

原为电真空器件发射机的老型号雷达在改型为全固态雷达时,在型号后面加上 SS(固态)两英文字母,例如 AN/TPS - 75SS。

## (三) 其他国家规定

世界其他国家的对空情报雷达代号都有各自的命名,如:俄罗斯早期对空情报雷达中的大部分以“Π - 数字”表示,法国雷达大部分以“TRS - 数字”表示,意大利雷达大部分以“RAT - 数字”表示,英国雷达大部分以“AR - 数字”或“S - 数字”表示等。有的雷达还冠以公司代号或雷达商品代号,如 Commander(指挥官)、Master(主人)等。

### 三、对空情报雷达工作频段划分及地面雷达工作频率特点

#### (一) 雷达的频段划分

从原理上讲,雷达的工作频率没有根本的限制。实用雷达的工作频率已经从高频频段(3MHz ~ 30MHz)扩展到毫米频段(30GHz ~ 300GHz)。但这还不是极限,地波高频雷达的频率可低到 2MHz,激光雷达的工作频率比 300GHz 还要高。

为了使用方便,其中又划分为若干频段。

我国无线电管理委员会对此范围内各频段划分如表 1-1 所列。

表 1-1 我国无线电管理委员会频段划分表

| 频段名称     | 频率范围            | 波段名称 |    | 波长范围        |
|----------|-----------------|------|----|-------------|
| 高频(HF)   | (3 ~ 30)MHz     | 短波   |    | (100 ~ 10)m |
| 甚高频(VHF) | (30 ~ 300)MHz   | 米波   |    | (10 ~ 1)m   |
| 特高频(UHF) | (300 ~ 3000)MHz | 分米波  | 微波 | (10 ~ 1)dm  |
| 超高频(SHF) | (3 ~ 30)GHz     | 厘米波  |    | (10 ~ 1)cm  |
| 极高频(EHF) | (30 ~ 300)GHz   | 毫米波  |    | (10 ~ 1)mm  |

在第二次世界大战期间,美国为了保密,用诸如 L、S、X 等字母来代表雷达频段,后来虽然不再需要保密,但这些代号仍继续沿用,并且补充了一些代号,如表 1-2 所列。我国雷达界也沿用这些代号称呼。表中还列出了国际电信联盟(ITU)为Ⅲ区雷达分配的特定频率范围(世界分为 I、II、Ⅲ区,亚洲属于第Ⅲ区,各区分分配的特定频率范围有微小差别)。但是国际电信公约第 38 条规定:会员国对于本国军用无线电设备保留其完全的自由权,为了防止有害干扰及遇险援助应尽可能使用这些频率,当这种军用设备参加公共业务时,则通常必须遵守这些频率范围的规定。

表 1-2 美国常用雷达频段代号及频率范围

| 频段<br>代号 | 标称频率<br>范围<br>/MHz | ITU 规定的<br>雷达频率范围<br>/MHz  | 频段<br>代号 | 标称频率<br>范围<br>/MHz | ITU 规定的<br>雷达频率范围<br>/MHz      |
|----------|--------------------|----------------------------|----------|--------------------|--------------------------------|
| HF       | 3 ~ 30             |                            | C        | 4000 ~ 8000        | 5250 ~ 5925                    |
| VHF      | 30 ~ 300           | 138 ~ 144<br>216 ~ 225     | X        | 8000 ~ 12680       | 8500 ~ 10680                   |
| UHF      | 300 ~ 1000         | 420 ~ 450<br>890 ~ 942     | Ku       | 12500 ~ 18000      | 13400 ~ 14000<br>15700 ~ 17700 |
| P        | 230 ~ 1000         |                            | K        | 18000 ~ 27000      | 23050 ~ 24250                  |
| L        | 1000 ~ 2000        | 1215 ~ 1400                | Ka       | 27000 ~ 40000      | 33400 ~ 36000                  |
| S        | 2000 ~ 4000        | 2300 ~ 2500<br>2700 ~ 3700 | mm       | 40000 ~ 300000     |                                |

我国无线电频率管理委员会、我军无线电频率管理委员会都有更详细的规定。

另外,1979年日内瓦国际无线电管理会议规定了新的国际上通用的无线电频段代号,已经在欧洲和我国电子对抗等领域使用。这些规定列于表 1-3 中。

表 1-3 国际无线电管理会议规定的无线电频段代号

| 频段代号 | 标称频率范围          | 频段代号 | 标称频率范围        |
|------|-----------------|------|---------------|
| HF   | (10 ~ 30)MHz    | G    | (4 ~ 6)GHz    |
| VHF  | (30 ~ 100)MHz   | H    | (6 ~ 8)GHz    |
| A    | (100 ~ 250)MHz  | I    | (8 ~ 10)GHz   |
| B    | (250 ~ 500)MHz  | J    | (10 ~ 20)GHz  |
| C    | (500 ~ 1000)MHz | K    | (20 ~ 40)GHz  |
| D    | (1 ~ 2)GHz      | L    | (40 ~ 60)GHz  |
| E    | (2 ~ 3)GHz      | M    | (60 ~ 100)GHz |
| F    | (3 ~ 4)GHz      |      |               |

这些不同的规定使得一些资料中出现频段代号混乱,但经过熟悉之后就很容易看出,表 1-3 中的“D”频段与表 1-2 中的“L”频段是一样的,表 1-3 中的“E、F”频段也就是表 1-2 中的“S”频段等等。

## (二) 地面雷达工作频率特点

不同的雷达频段有各自的工作特性,对这些频段的基本使用特点简述如下。

### 1. 高频以下(低于 3MHz)

此频段具有良好的绕射传播特性,可以传播到雷达视距之外,有时把此频段称为地波或表面波。但此频段实现定向波束需要很大的天线,环境噪声电平很高,频谱很拥挤。地波超视距雷达使用了这一频段。

### 2. 高频((3~30)MHz)

此频段可以利用电离层反射作为探测超视距的远距离目标,但同样存在高频以下频段所述的问题。天波超视距雷达工作在这一频段。

### 3. 甚高频((30~300)MHz)

这是对空情报雷达的一个重要频段,利用地面反射效应可以获得较远的探测距离,但低空覆盖性能较差,在实用的天线尺寸上难以获得高的测角精度和分辨力,频谱也比较拥挤。随着隐身目标的出现和对付反辐射导弹战场环境的要求,人们日益注重这一频段雷达的发展,并采用波束锐化技术提高其测向性能。目标“潜振”雷达和米波综合脉冲孔径稀布阵雷达亦在此频段以新的体制形式发展。

### 4. 超高频((300~1000)MHz)

此频段与表 1-2 中所称的 P 频段基本重叠。对于对空情报雷达而言,这是一个良好的频段,易于获得实用的波束宽度,外部噪声也比较小,且受气象影响较小,动目标显示性能也易兼顾。但此频段被电视和通信占去了不少部分。

### 5. L 频段((1000~2000)MHz)

这是对空情报雷达的常用频段。能够在可容忍的天线尺寸下获得实用的引导精度和比较连续的覆盖范围,外部噪声低,并可获

得良好的动目标显示性能。此频段的大功率发射器件及固态发射机技术已经成熟,易于获得远的探测距离。远程空中交通管制雷达及二次雷达也广泛使用这一频段。

#### 6. S 频段((2000 ~ 4000)MHz)

此频段是引导用对空情报雷达的主要频段,用尺寸适中的天线就可以获得良好的测角精度和角分辨力,且外部噪声电平低,相应的大功率固态发射机也正在发展使用中。此频段动目标显示性能较 L 频段稍差且会受到气象回波的影响。

#### 7. C 频段((4000 ~ 8000)MHz)

此频段对于对空情报雷达而言,可以组成高精度的引导雷达,并具有良好的跟踪性能。但由于气象回波的影响,要有良好的信号处理性能。为此气象雷达将此频段作为重要频段之一。

#### 8. X 频段((8 ~ 12.5)GHz)

这一频段对地面对空情报雷达而言易受到气象衰减的影响,难以发挥天线大口径的优势,常用于要求测量精度和角分辨力较高、体积小、便于机动的雷达、机载雷达和气象雷达中。

#### 9. Ku 频段、K 频段、Ka 频段((12.5 ~ 40)GHz)和 mm 频段((40 ~ 300)GHz)

这一频段的优点是可以用较小口径的天线获得良好的角分辨力,且互相干扰很小,但大气衰减大(特别是在 22.2GHz 左右,是吸收性很强的水蒸气的谐振频率),外部噪声高,难以获得远的探测距离。在此频段有几个明显的透波性窗口,其频率为 35GHz、94GHz、140GHz(相应波长为 8.5mm、3.2mm、2.1mm),在这些频率上大气衰减不很严重,特别是在 35GHz 附近。近年来俄罗斯研制出了功率高达数百千瓦的回旋速调管发射机,并藉此研制出了分辨力达厘米级的远程相控阵雷达。这是一个正在开发的雷达频段。

## 第二节 现代对空情报雷达技术介绍

英国是第一个采用雷达和雷达网实施防空作战的国家。



1936年英国率先在泰晤士河口附近部署第一部“本土链”式短波对空警戒雷达,担负防空预警任务。1941年英国又沿英吉利海峡海岸线部署50部“本土链”式雷达,组成一个完整的对空警戒雷达网。此后,对空情报雷达作为防空预警的主要手段迅速发展起来。

对空情报雷达和雷达网至今已经历了60多年的发展与提高,无论是在技术理论方面还是在实际应用方面,都取得了突飞猛进的发展。特别是在20世纪80年代以后,随着微电子技术、计算机技术、通信网络技术和航空航天技术的迅速发展,现代对空情报雷达已发展成为一种技术含量极高,在现代战争中地位极为重要的兵器。

现代对空情报雷达技术包含极其丰富的内容,这里仅从理解后续内容出发,对其主要技术进行概要介绍。

## 一、全相参体制

早期的雷达是在高压脉冲调制下,发射机产生高频正弦振荡脉冲,通过天线以电磁波形式定向辐射到空中,目标所反射的电磁波被雷达天线接收,经接收机放大回波信号并显示;然后,从电磁波的传输时间来判定目标的距离,从天线的波束指向判定目标的方位和仰角。这种雷达每次发射的高频脉冲相位是随机的,其相邻发射脉冲乃至接收回波之间相位并无“参考”价值,故称“非相参”体制。

由于雷达是在大量固定目标回波之中检测运动的目标回波,径向运动目标对雷达回波有多普勒频率移动,从而引起回波相位移动,利用这种相位移动的不同,可以区分运动目标和固定目标回波进而剔除固定目标回波,并可以测量目标的速度。这就要求雷达每次发射的脉冲相位之间是可以互相“参考”的,称为全相参发射机。为了精确地测定回波之间的相位变化,需要有一基准的稳定本振频率源及相参频率和定时信号,构成所谓“全相参体制”雷达。