

对空情报雷达总体论证

—— 理论与实践

Air Surveillance Radar System Analysis : Principles and Practice



郦能敬 王被德 沈齐 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

对空情报雷达总体论证 ——理论与实践

郇能敬 王被德 沈齐 等著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书总结了近半个世纪以来,军用对空情报雷达系统论证的实践经验,并由多位老专家合作写成。其内容包含了对空情报雷达系统论证在技术方面上的主要问题;有理论,有实践,有经典,有创新。全书共13章。第1章简要回顾对空情报雷达的历史,并分析其发展趋势。第2、3、4、5章就对空情报雷达的基本作战需求、作战使用性能、技术体制和主要战术技术指标四个方面应该如何论证,做了详细分析,这些是雷达论证的主要内容。第6、7章对雷达总体结构以及可靠性、维修性、保障性这两个雷达总体要求的重要方面做了专门论述。第8、9、10章则对影响对空情报雷达效能的阵地、气象、目标三个重要外部条件进行分析,并提出正确的处理措施。第11、12、13章分别就对空情报雷达的组网使用、效能评价、性能检验三者的原则和方法,做了论述,这些也是雷达系统论证的重要内容。

书中收集了对空情报雷达系统论证工作中常用的大量公式、图表和详实的资料,具有先进性和实用性。本书不仅适合于军用对空情报雷达系统,也适合于其它各种雷达和电子系统的论证。

本书适用于雷达系统的总体和分系统论证人员、设计人员、检验人员和使用人员学习使用,还可供有关机关、研究院所和院校工作和教学的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

对空情报雷达总体论证理论与实践/酆能敬,王被德,
沈齐等著. —北京:国防工业出版社,2008.12
ISBN 978-7-118-05958-8

I. 对... II. ①酆... ②王... ③沈... III. 地面雷达IV.
TN959.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第143838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100048)
北京奥鑫印刷厂印刷
新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 31¼ 字数 700千字
2008年12月第1版第1次印刷 印数 1—4000册 定价 48.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474
发行业务:(010)68472764

前 言

新中国建国初期,中央军委十分重视雷达装备的建设,在南京组建了第一个雷达工厂。1953年,该厂开始自主研制两种对空情报雷达:一种是米波远程警戒雷达;另一种是微波低空和海面警戒雷达。雷达应有什么样的性能要求,如何来鉴定研制成的样机,检验其是否达到预定的战术技术要求,这是雷达总体论证的基本任务,该任务当时由管理雷达装备的军委通信部雷达处承担。这是我国研制雷达系统的开始,也是雷达总体论证工作的开端。

20世纪50年代到60年代中期,我国雷达研制能力得到迅速发展,研制和生产了十多种对空情报雷达,与此同时雷达论证工作也得到长足的进步。论证内容和工作程序不断完备,论证内容包括:雷达装备长期规划、雷达型号总体论证、雷达产品质量检验、雷达样机检飞和鉴定、新型雷达使用意见反馈等。当时负责全军雷达论证工作的技术干部不到10人,但他们刻苦学习,力求掌握雷达的发展方向与新雷达技术,经常长时间到雷达工厂、研究所、雷达站、检飞基地蹲点,与雷达科技人员、雷达部队指战员交朋友,研讨技术问题与作战使用问题。因此,他们的论证建议能被军方领导采纳,也受到研制单位的欢迎。同时,还积极参加一些学术活动,发表一些雷达系统方面的研究心得,如雷达目标特性等。与此同时,雷达部队的科技干部也在雷达运用研究上作出成绩。例如,郑乃森同志对米波雷达阵地选择、王被德同志关于气象对雷达波传播的影响等研究,都是既有创新又很实用的科研成果。

十年动乱中,雷达的论证和研制受到干扰和破坏,生产了很多无用的雷达装备,既造成国家上亿财富的损失,又延误了我军雷达装备追赶国际先进水平的步伐。经过拨乱反正,特别是在1978年全国科学大会之后,雷达论证工作作为军队科研任务的重要部分再次受到很大重视。空军第二研究所以第一研究室为主,全力承担对空情报雷达的论证任务。论证队伍得到壮大,包括了部分军委通信部雷达论证研究室人员、空军第二研究所若干骨干和来自部队的优秀技术干部,论证工作的广度与深度不断提高。例如,借改革开放有利条件,通过收集国外资料和出国考察,掌握世界先进雷达系统和技术的发展;通过刻苦学习雷达系统理论和数字技术,学会论证相控阵雷达等新体制雷达和雷达数字处理系统;开展可靠性理论研究,学会论证雷达可靠性指标与检验技术;进行一系列基础性试验和测量,测量了军用飞机模型和实体的雷达截面积与地杂波特性,所得结果提供了我国自己的雷达基础数据;进行某些新雷达体制试验,掌握新雷达体制的第一手资料。

20世纪80年代到21世纪初,空军第二研究所的雷达论证工作牵引和配合电子工业部门的研究所和工厂,研制成功多种型号新一代对空情报雷达,为空军装备建设作出了贡献,多次受到上级奖励。盛继良与杨秉喜同志对可靠性理论公式的推导、邵治良与郑恩厚同志对雷达方舱和雷达天线结构的研究,王被德同志对双/多基地雷达方面的研究和试验,都受到雷达科技界的称赞。空军第二研究所的学术水平不断提高,在国内雷达学术界享有较高声誉,在国际上“中国空军雷达研究所”的名称亦多次见之于学术文献。本人也曾被多届国际雷达会议聘请参加会议组委会和出席会议报告论文。

新的世纪来临,中国将成为世界第一流大国,要具有世界第一流先进的雷达装备。雷达论证工作为适应这一形势要求,任重道远。首先,必须有更高的创新精神,不依赖国外型号,而要努力掌握雷达系统最前沿的科技发展。例如,近几年成为讨论热点的全向全时(ubiquitous)雷达或多输入多输出雷达(MIMO radar,综合脉冲孔径雷达或 SIAR 雷达是其中一个类型),要分析其优越性与可实现性,推动工业部门研制这些新体制雷达,建议领导机关和部队大胆试用这些雷达,从实践中体会其长处,促使它们成为新一代雷达装备。其次,论证要采用新工具,例如,用计算机做数字仿真和半实物仿真,使雷达效能分析、成本分析能较快地得出科学结论,并能在几个方案中比较优选。

老一辈雷达论证工作者,其中 20 世纪 50 年代前期服役的,已在髦耄之年,几位英才,如郑乃森、盛继良、邵治良已经作古。20 世纪 80 年代成为主力的同志,亦已退休。新一代雷达论证研究人员,年富力强,学历较高,他们有能力接好班。但他们也需要吸收老一辈科技工作者多年积累的有用知识和经验,老同志们也愿意把他们各自所长的精粹奉献出来。因此,在空军装备研究院雷达与电子对抗研究所领导的大力支持下,集合了一批资深饱学的老专家,开始这本书的写作。本书的内容有的是经长期实践又提高到理论,如郑乃森同志写的雷达阵地选择,他克服癌症病痛完成 7 万余字的篇章。有的是近年研究新成果,如王被德同志关于气象对雷达波传播效应的研究内容,1997 年列入国家标准;杨秉喜同志关于雷达可靠性、维修性与保障性的论证,是我国 21 世纪开展的研究与实践;又如酆能敬同志关于情报雷达频率优选论证采用了近年反隐身技术的研究成果,他的雷达网基础理论是 21 世纪初发表的。有的基础性测量与研究结果,过去发表后即受到国际重视,如酆能敬、沈齐同志关于地杂波谱形的研究结论,已被美国新版权权威著作《雷达系统导论》引用。综上所述,可见本书是具有较大的实用价值和较高的学术水平。希望它能有助于新一代雷达论证工作者和广大雷达总体研究设计人员。

本书是集体劳动的成果,各章、节分别由较熟悉该专项的同志撰写。各章的作者如下:第 1 章与第 2 章屠国纶,第 3 章张惜春,第 4 章与第 5 章酆能敬、王被德、贾玉贵、沈齐,第 6 章郑恩厚,第 7 章杨秉喜,第 8 章郑乃森,第 9 章王被德,第 10 章王被德、酆能敬,第 11 章屠国纶,第 12 章酆能敬,第 13 章贾玉贵、酆能敬,全书由王被德审稿和统编。各章中几处关于电波传播的计算内容,均应以第 9 章的内容为准,因为该章系根据国家军用标准 GJB/Z—87/97 编写的,是“在我国三十余年电波观测数据积累和理论分析研究的基础上,吸收了国际上电波传播领域公认最新实用成果编制而成”的标准。

在本书的编写出版过程中,空军装备研究院雷达与电子对抗研究所领导给予大力支持,刘波、周苑、冯华、薛春华和樊芳莉同志做了许多工作,在此致谢。

酆能敬
2008 年 4 月

目 录

第 1 章 对空情报雷达的历史与发展	1
1.1 对空情报雷达发展简史.....	1
1.1.1 世界对空情报雷达发展简史	1
1.1.2 我国对空情报雷达发展简史.....	11
1.2 对空情报雷达发展现状与发展趋势	17
1.2.1 对空情报雷达天线的发展现状与发展趋势.....	18
1.2.2 对空情报雷达发射机发展现状与发展趋势.....	21
1.2.3 对空情报雷达低功率处理部分发展现状与发展趋势.....	23
附录 对空情报雷达发展阶段(划代)研究(摘要)	26
参考文献.....	30
第 2 章 现代战争中对空情报雷达的基本作战需求	31
2.1 现代战争中对空情报雷达的任务	31
2.1.1 担负国土防空和防天预警侦察任务.....	31
2.1.2 担负情报信息支援任务.....	31
2.2 现代战争中对空情报雷达所面临的目标环境	32
2.2.1 目标环境概述.....	32
2.2.2 现代战争中第三代和第四代对空情报雷达所面临的目标环境需求.....	32
2.3 现代战争中对空情报雷达所面临的电子战环境	33
2.3.1 电子战环境概述.....	33
2.3.2 现代战争中第三代和第四代对空情报雷达所面临的电子战环境需求.....	33
2.4 现代战争中对空情报雷达所面临的其它作战需求——阵地、气象.....	36
2.4.1 阵地环境需求.....	36
2.4.2 气象环境需求.....	37
参考文献.....	38
第 3 章 对空情报雷达作战使用性能论证	39
3.1 概述	39
3.1.1 必要性论证.....	39
3.1.2 可行性论证.....	39
3.1.3 作战使用性能论证的主要内容.....	40
3.2 主要探测性能	40

3.2.1	最大探测距离	40
3.2.2	最小探测距离	40
3.2.3	方位范围	40
3.2.4	高度范围	40
3.2.5	速度范围	40
3.2.6	仰角范围	41
3.2.7	仪表量程	41
3.3	测量性能	41
3.3.1	测量目标坐标维数	41
3.3.2	测量精度	41
3.3.3	分辨力	41
3.3.4	数据率	41
3.3.5	目标容量	42
3.4	电磁防御性能	42
3.4.1	概述	42
3.4.2	论证应掌握的问题	45
3.5	机动性能	47
3.5.1	雷达按架设状态分类	47
3.5.2	机动性能对作战使用的影响	47
3.5.3	主要指标及论证要求	48
3.6	环境适应性能	48
3.6.1	雷达主要使用环境因素	48
3.6.2	提高雷达自身环境适应能力应关注的问题	49
3.7	其它作战使用性能	49
3.7.1	概述	50
3.7.2	论证要点	50
3.8	论证中应当重视的问题	50
3.8.1	雷达联网工作能力	50
3.8.2	目标识别	50
3.8.3	软件开发应用	51
3.8.4	指标匹配性	51
3.8.5	功能指标兼容性	51
3.8.6	采用计算机仿真模拟技术	51
3.8.7	功能指标的可检测性	52
附录	铁路装载限界图	52
第4章	对空情报雷达的技术体制论证	53
4.1	常用的技术体制	53
4.1.1	两坐标对空情报雷达	53
4.1.2	三坐标对空情报雷达	61

4.1.3	测高雷达	74
4.1.4	多功能相控阵对空情报雷达	75
4.2	抑制杂波的技术体制	83
4.2.1	在杂波中提取运动目标回波的基本原理	83
4.2.2	非相参体制雷达与全相参体制雷达	84
4.2.3	衡量动目标提取性能的主要指标	85
4.2.4	动目标显示与动目标检测技术	86
4.2.5	脉冲多普勒体制	89
4.3	扩展探测的技术体制	95
4.3.1	预警机	95
4.3.2	双/多基地雷达	99
4.3.3	天波超视距雷达	112
4.3.4	地波超视距雷达	113
4.3.5	微波超视距雷达	113
4.3.6	气球载雷达	114
4.4	成像识别的技术体制	121
4.4.1	超宽带雷达	121
4.4.2	逆合成孔径雷达	122
4.5	其它技术体制	124
4.5.1	全向全时雷达与综合脉冲孔径雷达	124
4.5.2	无源雷达	126
	参考文献	134
第5章	对空情报雷达的主要战术技术指标论证	135
5.1	雷达系统的战术技术参数	135
5.1.1	对空情报雷达探测威力	135
5.1.2	对空情报雷达的优选频率	144
5.1.3	对空情报雷达测量精度	153
5.1.4	改善因子和杂波中的可见度	167
5.2	雷达天馈线、发射、接收分系统的指标论证	170
5.2.1	天线分系统的指标	170
5.2.2	馈线分系统	171
5.2.3	发射分系统	171
5.2.4	接收分系统	172
5.3	信号处理分系统的指标论证	172
5.3.1	信号处理分系统的发展特点	173
5.3.2	信号处理电路的种类及相应的技术指标	173
5.3.3	其它信号处理	177
5.3.4	信号处理电路的发展探讨	178
5.4	终端分系统的技术指标	179

5.4.1	坐标录取	180
5.4.2	数据处理	180
5.4.3	数据融合	180
5.4.4	数据输出和显示	181
	参考文献	181
第6章	对空情报雷达总体结构方案论证	182
6.1	雷达总体结构要求综述	182
6.1.1	雷达总体结构方案论证的内容	182
6.1.2	雷达总体结构方案论证分类	182
6.2	风与雷达结构设计	182
6.2.1	雷达抗风指标对结构设计的影响	182
6.2.2	雷达抗风指标对结构设计的影响	183
6.2.3	地面情报雷达抗风指标的确定	183
6.2.4	地面情报雷达抗风计算基本公式	183
6.2.5	减小风载荷途径、利弊、补救措施	184
6.3	机动性	186
6.3.1	概述	186
6.3.2	关于雷达机动性主要指标的内容	187
6.3.3	定量评价雷达机动性	188
6.3.4	提高雷达机动性的途径	190
6.4	雷达方舱	195
6.4.1	定义	195
6.4.2	雷达方舱特点	195
6.4.3	优越性	195
6.4.4	分类、结构、工艺和指标要求	195
6.4.5	历史和现状	196
6.4.6	发展中的问题	196
6.5	雷达电站	196
6.5.1	概述	196
6.5.2	雷达电站主要战术技术要求	197
6.5.3	对空情报雷达电站选型及发展分析	197
6.6	雷达总体结构论证中的特殊问题	200
6.6.1	防轰炸	200
6.6.2	米波雷达天线馈线受潮分析与预防措施	200
6.6.3	雷达天线防腐	207
6.6.4	关于雷达结构的标准化	218
	附录 相关的国标与国军标	220
	参考文献	220

第 7 章 对空情报雷达可靠性、维修性、保障性要求论证与试验评价方法	221
7.1 可靠性、维修性、保障性工程的发展	221
7.2 雷达可靠性、维修性、保障性基本概念和参数体系	222
7.2.1 RMS 基本概念	222
7.2.2 雷达 RMS 参数体系	233
7.3 雷达 RMS 要求论证程序和方法	237
7.3.1 概述	237
7.3.2 RMS 要求的类别	238
7.3.3 RMS 定性要求	238
7.3.4 RMS 定量要求	242
7.3.5 RMS 工作项目要求	242
7.3.6 说明 RMS 要求时应当明确的问题	245
7.3.7 可靠性、维修性要求论证程序和方法	248
7.3.8 保障性要求论证程序和方法	256
7.3.9 装备 RMS 指标论证程序	262
7.4 运用质量功能展开(QFD)对雷达 RMS 指标进行综合权衡分析	263
7.4.1 质量功能展开基本概念	263
7.4.2 QFD 运作程序	264
7.5 雷达可靠性、维修性、保障性检查、试验与评定	269
7.5.1 目的	269
7.5.2 雷达“三性”检查、试验与评定的基本概念	269
7.5.3 对“三性”检查中数据收集工作的要求	271
7.5.4 “三性”数据分析和评定	272
7.5.5 评定用统计方案	283
附录 可靠性、维修性、保障性常用符号、缩写词和国家军用标准目录摘编	294
参考文献	306
第 8 章 阵地地形影响与选择	308
8.1 阵地对雷达探测性能的影响	308
8.1.1 阵地影响的重要性	308
8.1.2 地形地物阻挡	308
8.1.3 地面反射对探测性能的影响	317
8.1.4 雷达探测范围计算	336
8.1.5 用太阳做信号源测雷达天线参数	344
8.2 阵地选择	353
8.2.1 图上作业	353
8.2.2 实地察看	356
8.2.3 阵地分析	356
参考文献	358

第9章 气象影响与修正方法	359
9.1 气象条件对雷达战术技术性能的影响.....	359
9.2 大气折射的后果及其修正.....	359
9.2.1 折射机理和数学式.....	359
9.2.2 折射与天气现象之间的一般规律.....	361
9.2.3 探测范围的改变和修正.....	362
9.2.4 测量参数的修正.....	372
9.3 大气衰减的影响及其修正方法.....	380
9.3.1 概述.....	380
9.3.2 衰减的后果及其修正.....	380
9.3.3 根据衰减修正雷达最大探测距离.....	380
9.3.4 传播衰减值的选取.....	381
9.4 大气散射的影响.....	401
9.5 电离层反射的影响.....	402
9.6 有关雷达电波传播的其它内容.....	402
9.6.1 探测范围和测定精度的预报及战术利用.....	402
9.6.2 超折射(大气波导)的探测与预测.....	402
9.6.3 电波传播在我军雷达工作中的重要地位.....	404
附录 指数大气条件下雷达探测坐标图的 MATLAB 计算程序.....	405
参考文献.....	408
第10章 雷达目标特性	409
10.1 目标特性对雷达战技性能的影响.....	409
10.2 回波幅度及其起伏特性的影响.....	409
10.2.1 回波的幅度反映了目标的大小、材料、结构和形状.....	409
10.2.2 回波幅度的起伏主要反映了目标的运动状态(但也有形状的因素).....	413
10.2.3 雷达对不同 RCS 的目标的最大探测距离换算方法.....	420
10.2.4 双基地雷达的目标 RCS.....	421
10.3 回波相位及频谱特性.....	422
10.3.1 回波相位的影响.....	422
10.3.2 信号频谱的影响.....	422
10.4 目标的极化特性.....	423
10.4.1 目标的去极化特性.....	423
10.4.2 目标的极化散射矩阵.....	424
10.4.3 目标的最佳极化特性.....	424
10.5 飞机目标的特性.....	425
10.5.1 飞机目标的平均 RCS.....	425
10.5.2 飞机目标信号的起伏特性.....	427

10.5.3	飞机目标信号的相位起伏	429
10.6	地、海杂波的特性	429
10.6.1	地杂波	430
10.6.2	海杂波	434
10.7	其它目标的特性	438
10.7.1	直升机的雷达目标特性	438
10.7.2	巡航导弹、战术弹道导弹弹头的雷达目标特性	438
10.7.3	舰船的雷达目标特性	438
10.7.4	无源干扰物的雷达目标特性	439
10.7.5	气象杂波的雷达目标特性	440
10.7.6	空飘气球的雷达目标特性	441
10.8	雷达目标识别的基本概念和方法	441
	参考文献	442
第 11 章	对空情报雷达的部署和组网	444
11.1	雷达部署原则和应当考虑的问题	444
11.1.1	雷达部署原则	444
11.1.2	对空情报雷达在部署中应当考虑的问题	446
11.2	雷达组网技术和数据融合	448
11.2.1	雷达组网的意义	448
11.2.2	雷达组网技术发展简述	449
11.2.3	对空情报雷达组网的基本形式	449
11.2.4	雷达组网所用关键技术	450
11.2.5	雷达组网时的数据融合	451
11.3	雷达组网效能指标计算方法(覆盖度、情报容量、抗干扰和抗摧毁效能)	451
11.3.1	对空情报雷达网的探测覆盖度的计算方法	452
11.3.2	对空情报雷达网情报容量的计算方法	452
11.3.3	对空情报雷达网的抗干扰效能的计算方法	453
11.3.4	对空情报雷达网的抗摧毁效能的计算方法	453
11.3.5	和平时期对空情报雷达网中雷达的部署和组网方法	454
11.3.6	从提高对空情报雷达网的抗干扰效能出发研究对空情报雷达的性能 参数和其部署方法	455
11.3.7	从提高对空情报雷达网的抗摧毁效能出发研究对空情报雷达的 部署方法	455
	参考文献	456
第 12 章	对空情报雷达总体效能费用比的评价	458
12.1	雷达总体效能费用比	458
12.2	雷达总体性能评价方法	458
12.2.1	雷达总体性能的评价方法	459

12.2.2	由雷达技术参数来计算雷达总体性能评价数值	459
12.2.3	对空情报雷达的本身可用度与避免损毁能力	462
12.2.4	对空情报雷达总体性能两种评价方法的比较	463
12.3	对空情报雷达效能费用比的计算与统计	463
	参考文献	464
第 13 章	雷达总体性能检验方法	466
13.1	雷达关键电参数的测试	466
13.1.1	天线性能测试	466
13.1.2	发射机稳定性能测试	468
13.1.3	系统改善因子及杂波中目标可见度测试	472
13.2	雷达飞行检验	472
13.2.1	威力和精度检飞架次的设计	472
13.2.2	雷达反地杂波和抗干扰性能的飞行检验	485
13.3	预警机雷达检飞	485
13.3.1	预警机监视雷达的特点	485
13.3.2	预警机雷达检飞地区的选择	485
13.3.3	预警机检飞航线设计原则	487
13.3.4	目标机不同姿态角的 RCS	488
13.3.5	地面杂波强度的测定	488
13.3.6	预警机雷达检飞航线与架次设计举例	491
	参考文献	496

第 1 章 对空情报雷达的历史与发展

1.1 对空情报雷达发展简史

1.1.1 世界对空情报雷达发展简史

对空情报雷达是一种用来搜索、监视和识别各种空中目标并确定其坐标和运动参数的雷达,又称对空搜索雷达或对空监视雷达。

早期(20 世纪 30 年代)的空中目标类型很少,主要是飞机,此外还有少量的飞艇和气球。因此,早期对空情报雷达所提供的空中情报,主要用于实施国土防空警戒、指挥和引导己方的作战飞机(战斗机或歼击机)以及各种地面防空武器(高炮、高射机枪、探照灯等)去拦截来袭敌机并指示敌机的空中坐标。经过 70 余年的发展,目前的对空情报雷达所搜索、监视和识别的对象即空中目标的类型已有很大变化,不但有飞机、直升机、无人机、巡航导弹、空地导弹、飞艇和气球等航空飞行器,而且又出现了弹道导弹、人造卫星、宇宙飞船和航天飞机等航天飞行器。再加上防空和防天的界限日益模糊和任务日益趋于统一,现代对空情报雷达除担负对飞机类目标预警的任务外,也担负对导弹类目标预警的任务。因此,依据现代对空情报雷达使用重点的不同,可把它们分为对飞机类目标探测和对导弹类目标探测两大类型(或两种工作模式)。对飞机类目标探测包括:用于发现和粗略探测飞机类目标坐标的警戒雷达以及用于发现和精确探测飞机类目标坐标并担负对战机指挥引导的引导雷达两种;如按对空情报雷达所搭载的平台分,可分为陆基及海基常规对飞机类目标探测的雷达以及空基和星基对飞机类目标探测的雷达两种。对导弹类目标探测包括:对中程战略导弹(中程弹道导弹)探测以及对远程战略导弹(洲际弹道导弹)探测的弹道导弹战略预警雷达;对中程和近程多种战术导弹探测的无源相控阵雷达以及有源相控阵雷达;天波后向散射超视距雷达;为各种地面反导拦截武器及时提供多种导弹坐标信息的目标指示雷达;多种空基和星基对导弹类目标探测的雷达等。

由于雷达存在一个突出优点,即无论白天和黑夜均可利用它探测到远距离上较小目标的位置变化,而且提供情报的速度极快(以光速传送)。因此,雷达至今仍是现代战争中一种必不可少的电子装备。尽管空中目标的类型已有很大变化,反雷达技术也已有很大发展,对空情报雷达的有效性和生存能力面临着十分严峻的挑战,但雷达仍然是现代战争中获取各种空中目标情报较为理想的一种手段。目前,世界上还没有发明出一种新机理传感器能完全替代它。

世界上第一部具有实用性的对空情报雷达,是 1936 年英国研制成功并用来探测法西斯德国空袭英国大不列颠岛的轰炸机的 CH 雷达(Chain Home,本土链)。从 CH 雷达问世至今这 72 年中,世界对空情报雷达技术的发展大致可分为三个阶段:第一阶段是第二次世界大战开始前后的早期雷达阶段,也可称为雷达的启蒙阶段;第二阶段是从第二次世界大战后期到 20 世纪 50 年代末、以非相参体制的微波雷达和米波雷达为主要特征的雷达发展阶段;第三阶段是从 20 世纪 60 年代开始至今,以全相参、全固态、有源相控阵为代表的多种体制雷达蓬勃发展的阶段,通常称为现代雷达阶段。

1.1.1.1 雷达的启蒙阶段(20世纪30年代中期至20世纪40年代初期)

1. 雷达发展的初期阶段

第一次世界大战期间,飞机开始成为作战武器之一,利用它可攻击敌方地面军队和轰炸敌方战略目标。为了防御敌机的空袭,需要及早发现来袭敌机,各交战国的军事指挥员普遍依靠具有较高目力的人或使用光学望远镜的对空观察哨和使用大型听音机(声波定位器)的对空听音哨来发现来袭敌机。这些原始、落后的方法和手段效率很低,精确度差,作用距离近,远远不能满足需要。例如,大型听音机最大作用距离只有13km,即使是对老式的双翼慢速飞机也只能提供大约4min的预警时间。幸运的是,当时的作战飞机其体积普遍较小、速度低、航程短、携带火力不强,对敌方的地面部队并未形成特别大的威胁。

到了20世纪30年代,由于世界航空工业有了很大的发展,飞机所用的活塞式航空发动机其推力不断增大,开始出现中远程轰炸机。这种飞机的速度比早期飞机提高了1倍,且能携带较多枚威力强大的航空炸弹去轰炸敌方纵深的战略目标,其破坏力明显增强,对地面部队威胁很大。防空作战迫切需要有一种类似于我国古代神话里曾提到的“千里眼、顺风耳”那样的兵器来对敌机的来袭进行预警。此时,雷达应运而生,并和无线电通信电台一起被誉为科学的“千里眼、顺风耳”。

为了对付日益增大的空中威胁,许多科学技术先进的国家都不失时机地投入了新的对空探测预警设备的研制。由于当时无线电技术已有长足的发展,特别是高频脉冲振荡器、短波和超短波定向天线以及阴极射线指示管等新技术已取得了突破性的进展,为雷达的问世创造了必要的条件。德、英、美、日、法、苏等国为了军事上的需要,均在差不多相同的时间各自独立秘密地开始了雷达的研究工作。其中仅英国从事雷达研究的高级技术人员就达3000人,并取得了显著成就。1935年2月26日,由英国科学家Arnold Wilkins等人在英国达文特里郡附近做的一次著名试验证明:飞机是在较远的距离上用无线电波探测到的。试验所用目标机为英国生产的Heyford型轰炸机,电波的频率为6MHz,属于短波波带,探测距离约24km。达文特里试验验证了这样一个计算成果,即当用短波无线电波“照射”空中的轰炸机时(其形式类似用地面探照灯光照射某个空中目标),就有足够的能量被轰炸机“反射”回到地面,并被地面的大型短波接收天线和高灵敏度的接收机探测到,其回波显示在阴极射线管的屏幕上,并可读出该轰炸机距雷达的距离。

1935年2月底,英国科学家Watson - Watt向英国防空委员会提交了一份备忘录,详细描述了这次探测飞机的达文特里试验,建议尽快加速发展这种双基地体制(收发分开体制)远程无线电探测预警兵器。CH雷达作为达文特里试验成果的直接继承者,很快就在英国科学家Henry Tizard、Watson - Watt、Arnold Wilkins、Bowen等人的指导下开始研制,并在1936年部署到英国泰晤士河口附近投入使用。尽管英国开始研究雷达的时间比德国和美国略晚,当时在世界上英国的技术也并不特别先进,但由于英国政府的特别重视和大力支持,CH雷达的研制进展很快,成效显著,成为世界上最早建成的实用性防空雷达而被载入史册。

CH雷达投入作战使用后不久,英国发现单部雷达的探测预警保障范围不足,难以完成整个国土的防空任务,遂决定再拨款100万英镑,在大不列颠岛东部沿海建立起由21部CH雷达所联合组成的世界上第一个对空警戒雷达网,并为此建立了复杂的有线电话网。把所有的CH雷达联系在一起,还设立了中央指挥站,这个雷达网于1937年投入使用。到1940年夏,德国发动“不列颠之战”时,这个雷达网又进一步发展为一个由80多个多种型号的雷达站和

1200 多个对空观察哨相结合的一个完整的对空探测预警系统。其作战效能是：能在远离英国大不列颠岛东南沿海海岸的 170km 的空域及时发现来袭的德国规模庞大的轰炸机群，并为英国地面防空部队的高射炮和探照灯部队以及空中的拦截战斗机群争取到了长达 45min 的预警时间。

2. “不列颠之战”与 CH 雷达的应用

1940 年 5 月，德国通过闪击战席卷了西欧大陆。1940 年 5 月 26 日至 6 月 4 日，35 万英法联军士兵通过著名的“敦刻尔克大撤退”，从死亡陷阱中逃出，撤退到英国，为盟军日后的反攻保存了一大批有生力量，创造了第二次世界大战史上一个伟大的奇迹。

当时，希特勒寄希望于德国强大的空军越过英吉利海峡摧毁英国的抵抗力量。为此，德国集中了各种作战飞机近 2600 架，而当时英国空军的全部作战飞机总共只有 1300 架。此外，由于德国在占领西欧大陆后对英国形成了一个弧形包围圈，其空军基地非常接近英国，从而加大了德国战机突击英国纵深的力度和攻击的频率。德国空军司令、纳粹德国第二号人物戈林对希特勒夸下海口，只用空袭即可征服英国。希特勒遂决定等到德国空军对英国实施集中攻击后，再确定英国登陆战（“海狮”行动）的具体作战方案。

1940 年 8 月 13 日，戈林下令实施“鹰袭”计划，1500 多架飞机开始对英国进行狂轰滥炸，“不列颠之战”的第一阶段战幕就此拉开。8 月 15 日，戈林倾其全部主力，向英国发动全面攻击，英国空军司令不得不动用其大部分战斗机迎击敌方飞机。由于英国空军依据雷达情报进行指挥引导，德国飞机在同英国空军的“一对一”战斗中损失惨重，但英军的整个通信系统也处于崩溃边缘，英军的战斗力大幅度下降。8 月 28 日，英国为了振奋士气，对德国首都柏林进行了轰炸。这一举措惹火了希特勒，他当即下令德国空军今后不再以消耗英国空军力量为重点，而改为对英国首都伦敦和其它大城市实施大规模空袭作为报复。9 月 7 日，德国空军开始轰炸伦敦，“不列颠之战”进入第二阶段。希特勒的这一新举措让英国空军松了一口气，但却使英国平民付出了巨大的代价。9 月 15 日下午，德国飞机再一次大举出动，对已被炸得残破不堪的伦敦市区实施大规模空袭。这次英国空军作了充分准备，在一天内共击落德国飞机 185 架，自己仅损失了 26 架。9 月 15 日这一天成为“不列颠之战”的转折点。考虑到德国空军损失惨重，9 月 17 日，希特勒决定把英国登陆战“海狮”行动无限期推迟，“不列颠之战”也进入了边打边停的第三阶段。以 1941 年 5 月 10 日德国空军对伦敦的最后一次惩罚性轰炸为标志，“不列颠之战”彻底结束。此后，戈林将德国空军的主力转移到东欧，开始为参加入侵苏联的“巴巴罗萨”计划作准备。

“不列颠之战”是世界战争史上规模最大的空战，经过近 10 个月的较量，最后以德军的惨败告终。整个“不列颠之战”中英国空军共损失了 915 架飞机和 414 名飞行员，而德国空军却损失了 1733 架飞机和 6000 多名飞行员。在德国空军的狂轰滥炸下，英国遭受了重大损失，但始终没有屈服。当时的英国首相丘吉尔曾在其《二战回忆录》中写道：“英国是凭借当时只有极少数人知道的雷达，挫败了 1940 年秋冬两季德国空军对大不列颠岛的攻击。”雷达的发明，为英国在第二次世界大战中获得国土安全奠定了基础。

CH 雷达，作为世界上第一部具有实用性的对空情报雷达，意义十分重大。CH 雷达除又名“本土链”雷达外，在英国历史上还称为 AMES-1 雷达。此外，在第二次世界大战后期，英国还曾采用“大笨钟”（Big Ben）来代表 CH 雷达组网。

CH 雷达除在“不列颠之战”期间因成功探测到来袭德国飞机从而立下丰功伟绩外，还曾在第二次世界大战后期组网探测到德军由欧洲大陆射向英国本土的 V-2（又名 A-4）导弹。

英国利用架设在英国东南沿海的 5 部 CH 雷达(其位置分别位于 Suffolk 郡的 Bawdsey、Essex 郡的 Bromley、Suffolk 郡的 Darsham、Kent 郡的 Dunkirk 和 Kent 郡的 Swingate)联网来预测 V-2 导弹的落点从而提供预警,并通过分析 V-2 导弹的弹道计算出火箭的发射位置,为英军轰炸机轰炸这些发射阵地提供情报。V-2 导弹的长度正好是 CH 雷达的工作波长 10m~15m 的 1/2,有一定的谐振作用,在用 CH 雷达探测来袭的 V-2 导弹时效果很好,预警距离一般在 160km 以上。

达文特里试验前,英国科学家们曾经错误地认为:雷达波长应当尽可能等于飞机尺寸(机长、翼展等)的 2 倍,才能取得良好的探测效果。考虑到当时德国大量使用的 Heinkel-111 型中型轰炸机的翼展为 22.5m,那么对空情报雷达采用波长为 45m 的水平极化波应当是最佳的。为此,在达文特里试验中采用了波长约 50m(即工作频率为 6MHz)的发射机,从而造成所用天线尺寸异常庞大,成本大大增加。通过达文特里试验证明了这样一个事实:雷达波长短一些,仍然可以探测到空中目标,只不过谐振作用差一点而已,采用太低的工作频率并无必要。因此,新研制的 CH 雷达的工作频率被提高到 20MHz~30MHz,相当于波长为 15m~10m。但即使是这样,CH 雷达的天线尺寸仍然是非常庞大的。

CH 雷达是一种双基地体制(收发分开体制)的远程预警雷达,之所以采用这种技术体制,一是当时大功率收发开关尚没有发明出来,二是与普遍采用无线电通信台的接收站和发射站的分置体制是一致的。

3. CH 雷达的发射天线和接收天线

CH 雷达的发射天线采用 3 座或 4 座高度为 360 英尺^①(109.728m)的钢质塔作为支架(早期的 CH 雷达有 4 座钢质塔,后来减为 3 座),发射天线架设在钢质塔之间,塔与塔之间的距离为 180 英尺(54.864m),即塔高的 1/2。发射天线有两组,分别称为主发射天线组和补盲用发射天线组,由两部完全相同的发射机分别馈电。主发射天线组由 8 个从高到低排列的端馈式半波长水平极化偶极子组成,相邻的偶极子间距为 5m~7.5m,即波长的 1/2,由发射机的工作频率决定。主发射天线组的中心点离地 215 英尺(65.532m)。在偶极子的后方装有反射体,从而在双塔间连线的垂直线上,也就是面向来袭敌机的方位上形成一个方位波束宽度约为 100°的水平发射波瓣。由于受到地面反射,主发射天线组的垂直发射波瓣呈花瓣形,从最低仰角处(即雷达地平线仰角为 0°处)开始计算:第一垂直发射波瓣的最大值处仰角为 2.6°;第二垂直发射波瓣的最大值处仰角为 7.8°;第三垂直发射波瓣的最大值处仰角为 13°,…依此类推。各垂直发射波瓣之间形成凹口,也就是发射盲区,其仰角分别为 5.2°,10.4°,15.6°,…依此类推。实践证明,第一垂直发射波瓣凹口对探测飞机目标的连续性影响最为严重,必须解决其补盲问题。为此,专门设置了补盲用发射天线组,由 4 个从高到低排列的端馈式半波长水平极化偶极子组成,相邻的偶极子间距也为 5m~7.5m,即波长的 1/2。补盲用发射天线组的中心点离地 95 英尺(28.956m),在偶极子的后方同样装有反射体。由于受到地面反射,补盲用发射天线组的垂直发射波瓣也呈花瓣形,但由于它们离地较近,因此,其各个垂直发射波瓣的最大值处仰角与主发射天线组有所不同。从最低仰角处(即雷达地平线仰角为 0°处)开始计算:第一垂直发射波瓣的最大值处仰角为 5.9°;第二垂直发射波瓣的最大值处仰角为 17.7°;…依此类推。由于第一垂直发射波瓣的最大值处仰角为 5.9°,较好地弥补了主发射天线组第一发射盲区(仰角为 5.2°)。从上面的描述中可知,无论是主发射天线组还是补盲用发射天线

^① 1 英尺≈0.305m。