

KONGGUAN YICI LEIDA

空管一次雷达

张尉 张兴敢 等编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

空管一次雷达

KONGGUAN YICI LEIDA

张 尉 张兴敢 等编著



國防工業出版社

内 容 简 介

本书共 13 章。第 1 章介绍空管一次雷达的产生、发展、种类和设备规范;第 2 章介绍发现、定位和录取目标的基本原理,简单描述雷达探测目标需要解决的问题及对策;第 3 章介绍各种回波的强度、统计、频谱和区域位置特性;第 4 章介绍噪声统计、频谱特性;第 5 章简单介绍奈曼—皮尔逊准则,导出匹配滤波器,分析各种环境下雷达探测性能;第 6 章将模糊函数与匹配滤波器结合进行信号波形分析,重点讨论了脉冲压缩特性;第 7 章介绍天线波束特点和射频通道组成;第 8 章介绍发射机组成及特点;第 9 章介绍接收机组成及特点;第 10 章介绍相参、正交双通道原理,重点讨论 MTD 特性、组成和点迹处理原理,介绍 MTD 处理典型结构及气象处理典型结构;第 11 章介绍目标跟踪过程、滤波原理,重点介绍了卡尔曼滤波原理;第 12 章介绍监控与显示原理;第 13 章简单介绍设备性能仪表测试方法。

本书可作为大专院校电子工程等有关专业的本科教材和培训资料,也可作为空管一次雷达工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

空管一次雷达/张尉等编著. —北京:国防工业出版社,
2015. 3
ISBN 978-7-118-10009-9

I. ①空... II. ①张... III. ①空中交通管制—雷
达管制 IV. ①V355. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 036834 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 字数 298 千字

2015 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 56.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

《空管一次雷达》 编审委员会

主 编 张 尉 张兴敢

编审人员 林 强 毕红葵 焦晓丽 姜朝毅
 张 兵 张尊泉 谢幼才 张新勋

序

空管一次雷达是监视雷达在空中交通管制中的典型应用,历经 60 余年的发展,在技术、性能及结构上已日益成熟。目前,正值空管一次雷达在我国大量装备使用,本书积极适应这一需求,可为我国民航实现雷达管制、发挥应有效能提供有力支撑。特别是对于雷达初学者、运用人员等,可以在学习和运用中理论联系实际,起到事半功倍的效果。

本书编写者多年从事雷达系统、雷达原理、信号处理等方面的教学和研究,在空管雷达运用和培训方面积累了丰富的经验。该书提出了模糊函数与匹配滤波器结合对信号波形的分析方法,梳理了自适应动目标检测处理和飞机目标自动录取、自动跟踪的过程,原理与系统结合,技术与应用并重。全书内容系统、条理清晰、深入浅出,为阅读者快速掌握该雷达提供了捷径,对致力于该雷达的学习、运用人员尤其具有重要的实用价值和指导意义。此外,考虑到本科生层次的需要,本书内容专业基础课程也有较好地衔接,可以作为高等院校雷达和相关专业的本科教材。

本书的出版,不仅是对现有雷达系统和雷达原理书籍的有益补充,也将为推动我国空管事业和雷达事业的发展贡献一份新的力量。



2015 年 1 月

前 言

空管一次雷达集飞机监视和气象探测于一体,是确保飞行安全、实现雷达管制和提高空域容量的基础,在保障日常飞行、主动式监视方面发挥着不可替代的作用。现在正是我国由民航大国向民航强国发展关键时期,《空管一次雷达》一书为需要掌握空管一次雷达工作原理、过程、运用的人员提供了及时的学习资料。

空管一次雷达紧密联系于监视雷达技术和空管需求,其技术复杂,内容繁杂,原理涉及数学公式多。本书引用经典雷达系统原著,查阅大量书籍、资料和互联网信息,梳理基本理论,简化重要公式推导过程,重新计算和标注曲线与图表,附加各章小结,对空管一次雷达系统探测空中目标、处理回波信号的脉络进行了描述。

各章附加思考题与习题,标有“*”号的为较难习题。本书编写分为如下层次:

- (1) 雷达探测目标基础:目标特性、杂波特性、噪声特性;
- (2) 雷达检测目标性能分析;
- (3) 模糊函数与匹配滤波器结合进行信号波形分析;
- (4) 信号处理讨论;
- (5) 数据处理讨论;
- (6) 其他分系统讨论。

编者积累多年雷达系统、雷达原理、信号处理的教学体验,结合雷达装备培训、运用经验,总结出本书主线为信噪比/信杂比、目标跟踪与虚警控制。本书可作为大专院校电子工程等有关专业本科教材和培训资料,也可作为空管一次雷达工程技术人员参考书,便于教学和培训,阅读者可根据需要合理取舍本书内容。

参加本书编审工作的还有董长清、江晶、舒重胜、李洪力、王晗中、赵耀文、欧阳和贵、陈轶、赵铁英、禾刚、袁伟等。李侠、张荣华等对本书的形成提出了宝贵的意见,在本书出版过程中,空军预警学院的王永良、谭贤四、徐庭新等做出了许

多贡献,正是大家的共同努力才使本书能正式出版。同时,编者对编写过程所参阅大量文献资料的作者表示感谢。

由于编审人员水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2015 年 1 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 空管雷达产生和发展	1
1.2 空管雷达种类	4
1.3 空管雷达设备及规范	7
1.4 主要技术参数与雷达性能之间的关系	9
1.5 本章小结	12
思考题与习题	12
第 2 章 目标探测基本原理	13
2.1 目标发现与人工录取	13
2.1.1 回波显示及目标发现	13
2.1.2 雷达坐标及人工录取	15
2.1.3 信噪比和信杂比	16
2.2 距离测量	18
2.2.1 距离测量方法	19
2.2.2 距离测量性能	20
2.3 方位测量	20
2.3.1 方位测量方法	21
2.3.2 方位测量性能	21
2.4 门限检测与自动录取	22
2.4.1 门限检测	22
2.4.2 自动录取	23
2.5 速度计算	25
2.6 空管雷达探测飞机目标需要解决的问题及对策	25
2.7 空管雷达探测气象目标需要解决的问题及对策	29

2.8 本章小结	31
思考题与习题	32
第3章 回波特性	33
3.1 目标分类	33
3.2 飞机回波特性	34
3.2.1 强度	34
3.2.2 统计特性	37
3.3 地面/海面回波特性	41
3.3.1 强度	41
3.3.2 统计特性	42
3.4 气象回波特性	43
3.5 回波频谱特性	45
3.6 杂波区域位置分布特性	48
3.7 本章小结	49
思考题与习题	50
第4章 噪声特性	51
4.1 噪声统计特性	51
4.2 噪声频谱特性	53
4.3 接收机中等效噪声	54
4.4 本章小结	57
思考题与习题	57
第5章 目标检测与雷达探测性能	59
5.1 奈曼—皮尔逊准则	59
5.2 匹配滤波器	62
5.3 雷达探测威力	64
5.3.1 噪声环境中雷达方程	65
5.3.2 噪声环境中雷达威力范围	68
5.4 雷达系统增/减信噪比对探测性能影响	73
5.4.1 微波馈线组件衰减信噪比	73

5.4.2 脉冲压缩提高信噪比与脉冲积累提高信噪比	73
5.5 地球曲率对雷达探测性能限制	75
5.6 地面对雷达探测性能影响	76
5.7 大气对雷达探测性能影响	78
5.8 杂波环境中雷达方程	83
5.8.1 面杂波环境中雷达方程	83
5.8.2 体杂波环境中雷达方程	84
5.9 干扰噪声环境中雷达方程	85
5.10 气象回波检测最大作用距离	86
5.11 本章小结	87
思考题与习题	87
第6章 信号波形分析	89
6.1 信号复数表示	89
6.2 模糊函数及其性质	90
6.3 模糊函数与匹配滤波器关系	96
6.3.1 模糊函数与匹配滤波器之间关系式	96
6.3.2 信号波形分析步骤	98
6.3.3 线性调频信号匹配滤波	98
6.4 多普勒敏感性对信号波形的限制	100
6.5 距离副瓣幅度对信号波形的限制	102
6.6 脉冲压缩对雷达探测性能影响	105
6.6.1 脉冲压缩后宽度和脉冲压缩系数	105
6.6.2 脉冲压缩提高回波信噪比/信杂比	106
6.7 长脉冲遮挡及解决措施	108
6.8 窄脉冲干扰和异步干扰剔除	110
6.9 非线性调频脉冲压缩特性	110
6.10 本章小结	112
思考题与习题	112
第7章 天线和射频通道	114
7.1 主要技术指标规范要求	114

7.2	天线设备组成	115
7.3	天线辐射图	117
7.3.1	空管雷达威力图需求	118
7.3.2	高/低波束接收特性	119
7.4	射频通道组成	120
7.5	本章小结	122
	思考题与习题	123
第8章	发射机	124
8.1	主要技术指标规范要求	125
8.2	放大设备组成	126
8.2.1	激励信号产生模块	127
8.2.2	放大模块	128
8.2.3	电源模块	129
8.3	监控分机	130
8.4	本章小结	132
	思考题与习题	133
第9章	接收机	134
9.1	主要技术指标规范要求	134
9.2	放大设备组成	135
9.3	放大/衰减特性	136
9.4	本章小结	137
	思考题与习题	138
第10章	信号处理	139
10.1	主要技术指标规范要求	139
10.2	回波相参鉴别及正交双通道处理	140
10.2.1	相参处理	140
10.2.2	对消与滤波	141
10.2.3	杂波抑制性能指标与系统稳定度限制	144
10.2.4	盲相与正交双通道结构	146

10.3	回波自适应动目标检测	147
10.3.1	窄带滤波器组分频道滤波	148
10.3.2	恒虚警率处理	153
10.3.3	剩余杂波图处理	157
10.3.4	零频道处理	158
10.3.5	二进制积累检测及跨周期回波滤除	159
10.3.6	回波信息数据提取	161
10.3.7	脉组参差变频及参差变周	162
10.4	点迹处理	163
10.4.1	预点迹数据归并与分辨	164
10.4.2	点迹凝聚	165
10.4.3	人工指定区域点迹过滤	166
10.5	信号处理典型框图	167
10.5.1	第一代 MTD	167
10.5.2	第二代 MTD	169
10.5.3	第三代 MTD	169
10.5.4	ASR-10SS 雷达 MTD 处理	170
10.5.5	3821 雷达 MTD 处理	171
10.5.6	STAR-2000 雷达 MTD 处理	172
10.5.7	ASR-23SS 雷达 MTD 处理	173
10.6	气象通道处理	173
10.6.1	晴空图自适应 FIR 滤波	174
10.6.2	STC 补偿	175
10.6.3	积累及分级	176
10.6.4	气象图确定	176
10.7	本章小结	177
	思考题与习题	178
第 11 章	数据处理	179
11.1	主要技术指标规范要求	179
11.2	目标跟踪过程	180
11.3	目标跟踪模型	182

11.3.1	目标运动模型	182
11.3.2	目标观测模型	185
11.4	目标跟踪滤波	185
11.4.1	$\alpha-\beta$ 滤波	185
11.4.2	卡尔曼滤波	186
11.4.3	交互式多模型滤波	193
11.5	点迹与航迹相关处理	196
11.5.1	跟踪门形成	196
11.5.2	航迹起始	197
11.5.3	点迹与航迹配对	198
11.5.4	航迹终止	200
11.6	人工指定区域航迹限制	200
11.7	与二次雷达目标数据配对处理	201
11.8	向 ATC 上报处理	201
11.9	本章小结	202
	思考题与习题	203
第 12 章	监控与显示	204
12.1	主要技术指标规范要求	204
12.2	工作状态监测与控制	205
12.3	性能参数在线测试	208
12.4	目标探测信息显示	209
12.5	本章小结	210
	思考题与习题	210
第 13 章	设备性能仪表测试	211
13.1	天线测试	211
13.2	馈线测试	213
13.3	发射机测试	214
13.4	接收机测试	216
13.5	信号处理器测试	219
13.6	数据处理器测试	220

13.7 本章小结	221
思考题与习题	221
附录.....	223
附录 1 傅里叶变换表	223
附录 2 卷积公式	224
附录 3 许瓦兹不等式	224
附录 4 缩略语及技术词汇表	225
参考文献.....	232

第 1 章 概 述

本章主要讨论空管雷达的产生和发展,并具体讨论空管一次雷达设备及规范,以及主要技术参数与雷达性能之间的关系。

1.1 空管雷达产生和发展

在空中交通管制(Air Traffic Control, ATC, 简称空管)应用中的雷达统称为空管雷达。空管雷达是空管系统中监视空中目标飞行情况的重要信息源,是确保飞行安全、实现雷达管制和提高空域流量的基础。

雷达的定义最早是英文 RADAR(RADio Detection and Range, 无线电探测与测距),它是由美国海军军官福尔特和塔格尔共同提出的。按照该定义,雷达的基本功能是通过获取从目标散射回来的电磁波发现目标,并测定目标的距离。随着雷达技术的发展,雷达的功能早已超出了该定义,不仅能测量目标的方位角、仰角,还能获取目标的速度、属性及特征,对目标成像等。

雷达最初应用于国土防空、监视引导。在第二次世界大战中,雷达以军用作战为主。随着民航需求的发展,在 1949 年,美国的民用航空局(前身为联邦航空局 Federal Aviation Administration, FAA)采用雷达作为民用飞机的主要导航设备,解决了恶劣气象条件下机场空域飞机的导航问题,1953 年,开始实施航路上的雷达导航方案。联邦德国航空交通管理局 1955 年在机场附近和航路使用一次雷达,使空管员可以实时掌握空中飞行目标的相互位置,向航行管制系统的自动化迈开了第一步。在 20 世纪 70 年代之前,雷达装备使用的发射机为磁控管形式,信号处理为模拟 MTI(Moving Target Indication, 动目标显示),以手动为主要录取方式,自动化程度低,可靠性较差,主要是 ASR-4 ~ ASR-7、ARSR-1、ARSR-2 等。

20 世纪 70 年代中雷达使用的发射机以速调管为主要形式,信号处理为数字 MTI,以自动为主要录取方式,自动化程度高,可靠性较高,如法国的 TA-10K,美国的 ASR-8K、ARSR-3,意大利的 ATCR-33K 等雷达。

70 年代后的雷达主要特点是具有 MTD(Moving Target Detection, 动目标检测),除此之外,雷达发展过程中出现的新技术逐步被采用,如高/低波束、线/圆

极化、独立气象通道、全相参体制、点迹/航迹录取、双通道冗余、遥控/遥视、BIT (Built - in Test, 机内测试) 等技术, 主要代表型号是美国的 ASR - 9。

80 年代至 90 年代初雷达采用了全固态发射机, 信号处理为 AMTD (Adaptive MTD, 自适应动目标检测), 以自动录取和自动状态监测为主, 双通道冗余, 雷达的可靠性、维修性、可用性和安全性极大提高, 雷达发展到更为完善和实用的阶段。如 RAYTHEON (雷神) 公司的 ASR - 10SS、ASR - 11, GRUMMAN (格鲁曼) 公司的 ASR - 12, THOMSON (汤姆逊) - CSF 公司的 STAR - 2000, WESTINGHOUSE (西屋) 公司的 ARSR - 4 等设备。

全相参体制及 MTD 和全固态发射机技术具有标志性的意义, 在全相参体制平台上所实现的 MTD 技术对杂波的抑制达到了极致, 全固态发射机的采用使雷达彻底固态化, 带来可靠性极大提高的同时又与采用脉冲压缩技术相适应。

空管雷达 L 波段的装备紧随 S 波段装备之后出现, 作用距离较远, 主要用于航路监视。如在 70 年代出现 THOMSON - CSF 公司的 LP - 23K, 90 年代出现加拿大 RAYTHEON 公司的 ASR - 23SS/16 型, 法国 THALES (泰勒斯) 公司 (原 THOMSON - CSF 公司) 的 TRAC - 2000 型, 意大利 AMS (阿列尼亚·马可尼系统) 公司的 ATCR - 22M/K。

军民兼用可以降低征地费、设备费、维护费等费用, 以及减少人员的组织和管理。如 1996 年, 美国 FAA 采购 ASR - 11 型雷达用于空管和军用机场, 取代之前 FAA 的 ASR - 7/8 和国防部的 GPN - 12/20/27 雷达, 图 1.1 (a) 所示为 ASR - 11 型雷达天线照片 (一次雷达天线上部是二次雷达天线)。该雷达称为 DASR (Digital ASR)。美国 L 波段三坐标远程监视雷达 ARSR - 4 (AN/FPS - 130) 就是由美国空军和美国联邦航空管理局联合开发的, 用以加强国土防空与空管监视能力, 图 1.1 (b) 所示为 ARSR - 4 型雷达天线照片。ARSR - 4 满足空军在强杂波环境下探测小雷达截面积目标, 天线低副瓣反干扰和对低空目标的

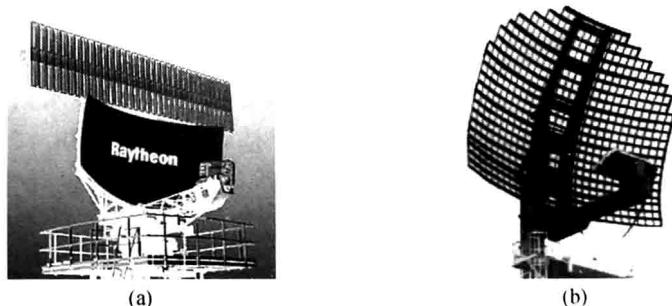


图 1.1 用于空管和军用机场的一次雷达天线照片

探测能力,同时也满足联邦航空管理局对低虚警、高精度和高分辨力的探测要求。其中,相控阵(Phased Array)体制的采用,可以提高目标的数据率、分辨力、长时间积累和多功能等性能。

我国20世纪五六十年代也采用军用防空雷达兼顾完成民航的空管任务,依靠多雷达站接力连续保障空管24h值班时间。随着民航需求的发展,与购置国际上著名厂商的商用飞机一样,民航局长期采购国际上著名厂商的航管雷达。

20世纪80年代中期,国营第七八四厂研制成功了797型近程航管一次监视雷达,采用数字稳频技术后的797-A型雷达应用于90年代初完成的我国“航管2号”系统中。1993年中国电子科技集团第三十八研究所研制成功了JY-21型S波段全固态航管一次监视雷达,该雷达采用国际同类雷达技术体制,同时完成飞机飞行监视和气象分布探测的双重功能。2007年该研究所研制成功了我国“空管4号”系统中的3821型近程空管一次雷达,该雷达各项指标均与国际标准接轨。2010年11月3821型雷达获颁《民用航空空中交通通信导航监视设备临时使用许可证》,标志着国产空管一次监视雷达可以进入到中国民航市场进行销售和服务。

20世纪70年代末我国也开始研究远程航管一次监视雷达,80年代初国营第七二〇厂研制出796型L波段航管一次监视雷达,该雷达采用了磁控管、频率分集技术、数字MTI、双波束锐截止天线及双套备份制。经过“九五”L波段全固态大功率发射机的科技攻关,第七二〇厂研制的L波段全固态航管一次监视雷达在军、民航建设工程中成批量装备。

现在,随着国家及军队经济条件改善,用于监视航路上及机场空域的民用飞机航运和军用飞机训练的空管雷达正被逐步补充或更换。空管雷达还兼顾监视不明飞行物,单部雷达不停机连续保障24h值班时间,在战争最初时刻第一时间将雷达从空管转到空防。

随着1953年军事安全部门将敌我识别(Identification of Friend or Foe,IFF)技术公开并增加了测距和测方位角功能后,20世纪60年代中期,二次雷达被应用于航空管制领域。如1963年联邦德国航空交通管理局不仅使空管员可以实时掌握空中飞行目标的相互位置,还能鉴别飞机和确定其高度,向航行管制系统的自动化迈开了新的一步。

20世纪70年代初开始实现了空管雷达联网全自动化,它将计算机技术和雷达技术完美地结合起来。图1.2为典型的空管控制中心组成示意图。图中本地一次、二次雷达探测到的飞机数据经过光纤传输,送到多雷达数据接口;异地一次、二次雷达探测到的飞机数据则经过卫星等传输,也送到多雷达数据接口。将不同雷达型号的数据格式变换成统一的格式。然后,所有的雷达数据经过多