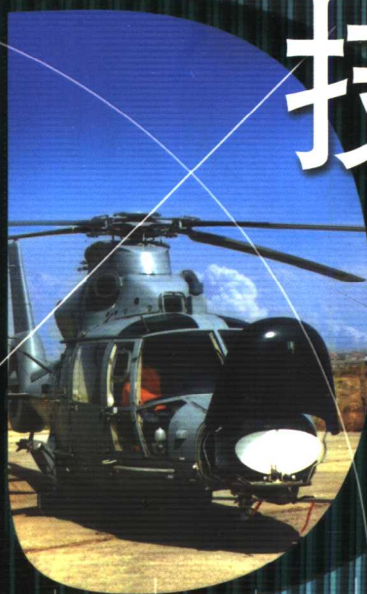




雷达技术丛书
<http://www.phei.com.cn>

“十一五”国家重点图书出版规划项目

机载雷达 技术



贲 德
韦 传 安
林 幼 权
编 著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

国家科学技术学术著作出版基金 资助出版
电子信息科技专著出版专项资金

雷达技术丛书

“十一五”国家重点图书出版规划项目

机 载 雷 达 技 术

贲 德 韦传安 林幼权 编著

電 子 工 業 出 版 社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

机载雷达是空中武器系统的重要组成部分,它的技术水平决定了军用飞机的作战性能,对国防具有重要的战略意义,机载雷达技术在国民经济领域也有很强的应用价值。

本书重点讨论了机载预警雷达和机载火控雷达的相关技术,全书分为三部分。第一部分讨论机载雷达的基本理论,包括工作体制和原理、信号频谱分析、杂波模型和计算、波形选择和信号处理。第二部分讨论机载预警雷达的性能指标要求、主要参数设计,以及脉冲多普勒与相控阵两种体制下的具体设计问题。第三部分讨论机载火控雷达的战术技术指标要求、主要工作方式,以及脉冲多普勒与相控阵两种体制下的具体设计问题。

本书总结了作者多年来机载雷达研制工作的经验,对于从事机载雷达研究工作的工程技术人员具有很高的参考价值。本书也可以作为高等学校相关专业高年级本科生和研究生的教材或参考书。

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

机载雷达技术/贲德,韦传安,林幼权编著. -北京:电子工业出版社,2006.12

(雷达技术丛书)

ISBN 7-121-03636-3

I. 机… II. ①贲… ②韦… ③林… III. 机载雷达 IV. TN959.73

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第153475号

责任编辑:张 濮

印 刷:北京智力达印刷有限公司

装 订:北京中新伟业印刷有限公司

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:787×960 1/16 印张:28.25 字数:490千字

印 次:2006年12月第1次印刷

印 数:4000册 定价:72.00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,联系电话:(010)68279077;邮购电话:(010)88254888。

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

服务热线:(010)88258888。



贾 隽

吉林九台人。1962年毕业于哈尔滨工业大学，曾任南京电子技术研究所副所长，现任所科技委副主任。长期从事雷达系统的研究与设计工作：20世纪60年代中期开始从事相控阵雷达课题的研究；70年代初作为主要技术负责人之一，出色地完成了我国第一部大型相控阵雷达的研制任务，为掌握相控阵雷达这一尖端技术做出了突出贡献；80年代初担任我国机载脉冲多普勒火控雷达的总设计师，突破了脉冲多普勒体制的关键技术，成功地主持完成了雷达工程设计，在机载雷达领域取得了重大成果。先后获得电子工业部科技成果特等奖两次，国家科学技术进步一等奖一次，并荣获光华基金特等奖及南京市第二届十大科技之星称号。2001年当选为中国工程院院士。



韦传安

江苏南京人。1963年毕业于北京航空学院（现为北京航空航天大学）。毕业后分配到南京电子技术研究所总体室工作，历任专业副组长、组长、研究室副主任，研究员级高级工程师。1969年以来一直从事机载雷达的研究工作，1975年后致力于机载脉冲多普勒雷达系统和总体技术的研究。1993年公派赴美国做高级访问学者。1980年获贵州省科技成果二等奖，1987年获南京军区军队级科学技术进步三等奖，1992年获电子工业部型号工程三等功，1995年获电子工业部有突出贡献专家称号，1998年获电子工业部科学技术进步一等奖，2005年获中国电子科技集团公司科学技术一等奖。



林勃权

浙江余姚人。1986年毕业于南京航空航天大学，1989年获得南京航空航天大学硕士学位，2001年获得西安电子科技大学博士学位，现为南京电子技术研究所副总工程师兼航空航天研究部主任，研究员。主要从事雷达系统设计和雷达信号处理的研究，曾参与和主持多个国家重点项目的研制工作，在国内外刊物和会议上发表20多篇论文。



“雷达技术丛书”编辑委员会

主 任： 王志刚

副 主 任： 王小谟 张光义 徐步荣 左群声 王 政 文宏武

委 员： (以下按姓氏笔画为序)

于景瑞 弋 稳 王德纯 平丽浩 匡永胜 李文辉 吴顺君

吴曼青 张祖稷 张润逵 张德斌 周文瑜 金 林 郑 新

柯建波 保 铮 贺瑞龙 贲 德 梅晓春 黄 槐 黄培康

董庆生 焦培南 薛海中

主 编： 王小谟 张光义

编辑部主任： 邱荣钦

编辑部副主任： 刘宪兰 赵玉洁 赵启成

编 辑： 李玉兰 毛 宏 李盛沐 王炳如 黄昭华

出版说明

“雷达技术丛书”是由中国工程院王小谟院士和张光义院士倡导并担任主编、中国电子科技集团公司负责组织、电子工业出版社负责出版的一套大型设计性系列丛书。这套“雷达技术丛书”(以下简称“丛书”)共16册,是我国雷达界多个单位的知名专家学者集体智慧的结晶,是他们长期实践经验的总结,是一套理论与实践相结合的佳作。

这套“丛书”的内容十分丰富,概括地说包括了3个主要方面的内容:一是介绍了影响雷达性能的目标特性和环境特性,包括目标(含隐身目标)的频率特性、散射特性、极化特性和起伏特性,地杂波、海杂波和气象杂波特性,噪声与干扰特性,大气与电离层传播特性等;二是介绍了雷达各分系统的设计,包括面天线与阵列天线、微波网络与微波传输线、固态与电子管发射机、频率源与模数接收机、信号处理与数据处理的基本原理、技术指标、设计方法和性能测试,还介绍了雷达系统与分系统的结构设计与制造工艺,包括微组装与柔性制造工艺,可靠性、可维性、环境适应性设计以及传动、架拆与运输规范的设计等;三是介绍了典型雷达系统的设计,包括各种二坐标与三坐标防空雷达、有源与无源相控阵雷达、机载预警与火控雷达、多普勒与相控阵制导雷达、脉冲与连续波精密跟踪测量雷达、合成孔径与逆合成孔径成像雷达、天波与地波超视距雷达等的基本原理、技术体制、战技性能、设计方法和联试与试飞等。

这套“丛书”的定义准确,原理清晰,语言简练,图文并茂,公式齐全,数据丰富,集设计性、实用性、新颖性于一体,是雷达科技工作者的设计指南,是雷达部队培训的良好教材,是高校电子工程专业及相关专业师生不可多得的教材和参考书。

“雷达技术丛书”编辑委员会编辑部

2004年12月29日



序

雷达在第二次世界大战中得到迅速发展，为适应战争需要，交战各方研制出从米波到微波的各种雷达装备。战后美国麻省理工学院辐射实验室集合各方面的专家，总结二战期间的经验，于 1950 年前后出版了雷达丛书共 28 本，大幅度推动了雷达技术的发展。我刚参加工作时，就从这套书中得益不少。随着雷达技术的进步，28 本书的内容已趋陈旧。20 世纪后期，美国 Skolnik 编写了雷达手册，其版本和内容不断更新，在雷达界有着较大的影响，但它仍不及麻省理工学院辐射实验室众多专家撰写的 28 本书的内容详尽。

我国的雷达事业，经过几代人 40 余年的努力，从无到有，从小到大，从弱到强，许多领域的技术已经进入了国际先进行列。总结这些成果，为我国今后的雷达事业发展做点贡献是我长期以来的一个心愿，在出版社的鼓励下，我和张光义院士倡导并担任主编，由中国电子科技集团公司负责组织编写了这套“雷达技术丛书”（以下简称“丛书”）。它是我国众多专家、学者长期从事雷达科研的经验总结，具有较好的系统性、新颖性和实用性。

雷达技术发展之快，使得传统的雷达观念、体系结构不断更新，在 20 世纪 50 年代的接收、发射、天线、显示典型的分机基础上，又发展到现在的雷达数据处理和信号处理分系统。本“丛书”就是按此体系进行了分册。随着微电子技术的发展，数字化还在不断前移，天线收发已经并继续不断引入了数字处理内容，信号和数据处理的界限越来越模糊，雷达体系正从流程型向网络型转变，由于目前其技术都尚未成熟，本“丛书”只在现有的体系中把这些新的内容进行了分别叙述。

“丛书”内容共分 3 个部分 16 分册：第一部分主要介绍雷达的目标特性和环境，第二部分介绍了雷达各组成部分的原理和设计，第三部分按典型应用雷达系统的分类对各雷达系统作了深入浅出的介绍。“丛书”各册著者不同，写作风格各异，但其内容的科学性和完整性是不容置疑的，通过对各分册结构和内容的审定，使各分册之间既具有较好的衔接性，又保持了各分册的独立性，读者可按需

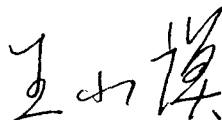
要读取其中一册或数册。希望此次出版的“丛书”能对从事雷达设计、制造的工程技术人员，雷达部队的干部、战士以及高校电子工程专业及相关专业的师生有所帮助。

“丛书”是从事雷达技术领域各项工作专家们集体智慧的结晶，是他们长期工作成果的总结与展示，专家们既要完成繁重的科研任务，又要在百忙中抽出时间保质保量地完成书稿，工作十分辛苦，在此，我代表“丛书”编委会向各分册作者和审稿专家表示深深的敬意！

“丛书”的出版，得到了中国电子科技集团公司、电子科学研究院、南京电子技术研究所、华东电子工程研究所等各参与单位领导的大力支持，得到了电子工业出版社领导和参与编辑们的积极推动，得到了“丛书”编辑部各同志的热情帮助，借此机会，一并表示衷心的感谢！

中国工程院院士

中国电子科技集团公司科技委副主任

A handwritten signature in black ink, appearing to read '王树' (Wang Shu), written in a cursive style.

前 言

自 1939 年第一部机载雷达在英国问世以来，机载雷达已有近 70 年的历史。当初的机载雷达是为了对付德国的潜艇，所以它的作用仅仅是观察海面目标。第二次世界大战促进了机载雷达的发展。而在战后，由于雷达理论和技术的进步，以及电子技术的高速发展，机载雷达技术有了日新月异的变化。它从最初功能比较简单，仅能完成空对空的探测及空对空的探测，发展到今天功能完备，且具有多种类型。本书仅侧重讨论机载预警雷达和机载火控雷达。

经过几十年的发展，当代的机载雷达无论性能还是相关技术都有了巨大的进步。早期的机载雷达一般采用脉冲体制，没有下视能力，限制了作战效能的发挥。由于技术进步和实际需求的推动，在 20 世纪 60 年代，脉冲多普勒机载火控雷达问世，开创了机载雷达的新时代，使机载雷达的性能有了质的提高。因此，脉冲多普勒雷达技术成为最重要的机载雷达技术。现代的战斗机都装备了脉冲多普勒火控雷达。

类似地，最初的机载预警雷达是把地面的警戒雷达搬到飞机上，也没有下视能力。在 20 世纪 60 年代，采用机载运动目标显示 (AMTI) 技术，雷达能在海杂波背景下检测低空运动目标，但尚不具备对陆地上空目标的下视能力，如美国的 E-2C 系列预警机。在 20 世纪 70 年代，机载预警雷达采用了脉冲多普勒技术，并采用具有极低副瓣的平板裂缝阵列天线，在俯仰方向上利用相控扫描测量目标高度。此时的机载预警雷达具备了优越的下视性能，而且装载预警雷达的预警飞机成为进行预警探测和指挥空中作战的空中移动指挥所，如美国的 E-3 系列预警机，至今它仍被世界许多国家装备使用。

当代最新的机载雷达采用有源相控阵体制，利用相控阵波束扫描灵活的优点，使机载雷达功能更加完善，同时使对付多目标的能力更强，代表了机载雷达的新水平和发展方向。

本书是“雷达技术丛书”中的一册，内容分三部分。第一部分为第 1~5 章，讨论机载雷达的基本概念和理论，涉及机载雷达的体制和工作原理、信号频谱分析、波形选择和信号处理、地/海杂波的分析与计算。第二部分为第 6~9 章，讨论机载预警雷达，包括对机载预警雷达的性能指标要求、雷达主要参数的设计计算，以及脉冲多普勒机载预警雷达与相控阵机载预警雷达的具体设计问题。第三部分为第 10~12 章，讨论对机载火控雷达的战术与技术指标要求、主要工作方

式，以及脉冲多普勒机载火控雷达与相控阵机载火控雷达系统的设计问题。

由于本书所讨论的机载预警雷达和机载火控雷达体制相同、原理类似，所以在编写中如何避免内容重复成为考虑的主要问题之一。本书采取的办法是：对于大致相同的内容，如果在预警雷达章节中有了，在火控雷达章节中就不再讨论，如雷达组成中的信号处理。有的内容乍看起来在两种雷达的章节中都有，但深入了解就会发现，这不是简单地重复，而是从不同的角度进行分析研究，以便于加深对问题的理解。

本书由贲德、韦传安和林幼权编著，第一部分（第1~5章）由韦传安撰写，第二部分（第6~9章）由林幼权撰写，第三部分（第10~12章）由贲德撰写。本书是多年来机载雷达研制工作的总结，是集体智慧的体现。这里要感谢邵智民先生、王立鸿先生、尹光甲先生、袁先明先生等人，他们杰出的工作丰富了本书的内容。在本书编写过程中，得到了赵玉洁先生和王炳如先生的大力支持，在此表示衷心的感谢。

我们力争把本书编写好，但由于水平所限，不足之处在所难免，希望读者批评指正。

编著者
2006年10月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 概论	(1)
1.1 机载雷达的发展历史和应用	(2)
1.1.1 机载雷达的发展历史	(2)
1.1.2 机载雷达的应用	(3)
1.2 机载雷达的基本体制	(4)
1.2.1 普通脉冲体制	(4)
1.2.2 脉冲多普勒体制	(4)
1.2.3 相控阵体制	(5)
1.2.4 连续波体制	(5)
1.2.5 脉冲压缩体制	(6)
1.2.6 合成孔径体制	(6)
1.3 机载雷达的工作原理	(7)
1.3.1 脉冲多普勒雷达的工作原理	(7)
1.3.2 相控阵雷达的工作原理	(8)
1.4 机载雷达的主要性能参数	(9)
1.4.1 探测距离	(9)
1.4.2 测量精度	(10)
1.4.3 抗干扰能力	(11)
1.4.4 物理参数	(11)
1.5 机载雷达的跟踪技术	(12)
1.5.1 角度跟踪	(12)
1.5.2 距离跟踪	(12)
1.5.3 多普勒跟踪	(12)
1.5.4 多目标跟踪	(13)
1.6 现役机载雷达概况	(13)
1.6.1 机载火控雷达	(13)
1.6.2 机载预警雷达	(16)
参考文献	(17)

第 2 章 信号频谱分析	(19)
2.1 连续波信号	(20)
2.2 脉冲信号	(20)
2.2.1 单个脉冲信号	(20)
2.2.2 无限长均匀脉冲串信号	(21)
2.3 射频脉冲信号	(22)
2.3.1 单个射频脉冲信号	(22)
2.3.2 无限长射频脉冲串信号	(22)
2.3.3 有限长射频脉冲串信号	(25)
2.4 周期性射频脉冲串信号	(28)
2.4.1 无限长周期性射频脉冲串信号	(28)
2.4.2 有限长周期性射频脉冲串信号	(30)
2.5 脉冲多普勒频谱	(31)
2.5.1 发射频谱	(31)
2.5.2 接收频谱	(32)
参考文献	(33)
第 3 章 机载雷达杂波的模型和测量	(35)
3.1 概述	(36)
3.1.1 研究杂波的目的	(36)
3.1.2 国外杂波研究概况	(36)
3.1.3 杂波研究的内容	(38)
3.2 杂波模型	(39)
3.2.1 杂波的理论模型	(39)
3.2.2 杂波的统计模型	(41)
3.3 杂波多普勒频谱	(44)
3.4 杂波测量	(45)
3.4.1 实验室测量	(46)
3.4.2 实地测量	(46)
3.4.3 杂波测量设备	(46)
3.4.4 杂波数据的记录与处理	(48)
3.4.5 主要结论	(51)
参考文献	(54)
第 4 章 机载雷达杂波的计算	(57)
4.1 概述	(58)

4.2	机载雷达杂波计算要素	(58)
4.2.1	杂波几何关系与坐标选择	(58)
4.2.2	机载雷达杂波方程式	(60)
4.2.3	杂波微分面积的计算	(61)
4.2.4	杂波计算中的模型假设和近似	(62)
4.3	机载雷达杂波计算方法	(64)
4.3.1	快速估算	(64)
4.3.2	严格计算	(65)
4.4	机载脉冲多普勒雷达杂波计算机计算实例	(66)
4.4.1	假设条件和已知参数	(68)
4.4.2	计算公式	(69)
4.4.3	计算程序	(72)
4.4.4	假设条件与计算结果	(77)
	参考文献	(78)
第5章	脉冲重复频率选择和信号处理	(79)
5.1	基本概念	(80)
5.2	脉冲重复频率的分类和基本特点	(81)
5.3	高脉冲重复频率	(81)
5.3.1	最小重复频率	(81)
5.3.2	距离遮挡与工作方式	(82)
5.3.3	迎头与尾后	(83)
5.4	低脉冲重复频率	(84)
5.4.1	空对空相参工作方式	(84)
5.4.2	空对面相参工作方式	(84)
5.4.3	非相参工作方式	(84)
5.5	中脉冲重复频率	(85)
5.5.1	主要特点	(85)
5.5.2	二维模糊和解模糊	(85)
5.5.3	二维盲区图	(88)
5.5.4	虚警抑制	(91)
5.6	信号波形参数设计	(92)
5.6.1	低脉冲重复频率信号参数设计	(92)
5.6.2	高脉冲重复频率信号参数设计	(92)
5.6.3	中脉冲重复频率信号参数设计	(94)

5.7	目标特性	(95)
5.7.1	目标的雷达截面积	(95)
5.7.2	目标起伏模型	(95)
5.8	目标检测	(97)
5.8.1	目标检测原理	(97)
5.8.2	噪声限制	(98)
5.8.3	检测性能评估	(98)
5.9	自动检测	(98)
5.9.1	自动检测原理	(98)
5.9.2	单元平均恒虚警率处理	(99)
5.9.3	有序统计量恒虚警率处理	(100)
5.9.4	其他恒虚警率处理	(100)
5.10	脉冲多普勒处理	(101)
5.10.1	MTI 处理	(101)
5.10.2	离散傅里叶变换	(102)
5.10.3	快速傅里叶变换	(102)
5.10.4	偏置相位中心天线技术	(103)
5.11	合成孔径处理	(104)
5.11.1	合成孔径概念	(104)
5.11.2	多普勒波束锐化	(105)
5.11.3	聚焦式合成孔径处理	(105)
5.11.4	干涉式合成孔径处理	(106)
	参考文献	(107)
第 6 章	机载预警雷达概述	(109)
6.1	机载预警雷达的任务	(110)
6.1.1	军用	(110)
6.1.2	民用	(111)
6.2	机载预警雷达的发展概况	(112)
6.2.1	美国 E-2C 系统	(112)
6.2.2	美国 E-3A 系统	(114)
6.2.3	俄罗斯机载预警系统	(116)
6.2.4	英国“Nimrod”系统	(116)
6.3	机载预警雷达的发展趋势	(117)
	参考文献	(120)

第 7 章 机载预警雷达的性能指标	(121)
7.1 战术指标	(122)
7.1.1 威力	(122)
7.1.2 空域覆盖	(123)
7.1.3 测量精度	(123)
7.1.4 分辨率	(124)
7.1.5 多目标处理能力	(124)
7.1.6 抗干扰能力	(124)
7.1.7 可靠性	(124)
7.1.8 体积、重量和功耗	(125)
7.2 技术指标	(125)
7.2.1 波段	(125)
7.2.2 天线形式	(128)
7.2.3 工作方式	(130)
7.2.4 信号处理方式	(133)
7.2.5 测角方式	(145)
7.2.6 数据处理方式	(146)
参考文献	(146)
第 8 章 机载预警雷达的参数设计	(147)
8.1 天线增益	(148)
8.2 辐射功率	(149)
8.2.1 信噪比	(149)
8.2.2 系统损耗	(152)
8.3 天线副瓣电平	(154)
8.3.1 天线副瓣与杂波强度的关系	(155)
8.3.2 天线副瓣要求	(156)
8.4 系统动态范围	(158)
8.4.1 目标信号的动态范围	(158)
8.4.2 杂波回波信号的动态范围	(159)
8.5 系统稳定度要求	(161)
8.5.1 稳定度的定义	(161)
8.5.2 寄生信号的产生源	(163)
8.5.3 信号稳定性要求	(166)
8.6 工作波形设计	(168)

参考文献	(168)
第9章 机载预警雷达系统设计	(169)
9.1 机载预警雷达的设计流程	(170)
9.2 机载预警雷达的组成	(171)
9.2.1 机械扫描体制	(171)
9.2.2 相控阵体制	(172)
9.3 天线、馈线分系统	(173)
9.3.1 功能	(173)
9.3.2 主要技术指标	(173)
9.3.3 机械扫描天线	(175)
9.3.4 相控阵天线	(178)
9.3.5 随机幅度和相位误差对阵列天线波瓣性能的影响	(189)
9.4 发射分系统	(192)
9.4.1 功能	(192)
9.4.2 主要技术指标	(192)
9.4.3 组成	(193)
9.4.4 发射管	(193)
9.4.5 调制器	(194)
9.4.6 电源	(196)
9.4.7 控制保护电路	(196)
9.4.8 固态发射机	(197)
9.5 接收分系统	(201)
9.5.1 功能	(201)
9.5.2 主要技术指标	(201)
9.5.3 组成	(202)
9.5.4 信号产生器	(203)
9.5.5 频率源	(207)
9.5.6 接收通道	(207)
9.6 信号处理分系统	(222)
9.6.1 功能	(222)
9.6.2 主要技术指标	(222)
9.6.3 组成	(224)
9.6.4 预处理	(224)
9.6.5 多普勒频率滤波器	(225)