

空军装备系列丛书

AIRBORNE RADAR

机载雷达装备

《空军装备系列丛书》编审委员会 编

总主编 张伟



航空工业出版社

空军装备系列丛书

机载雷达装备

《空军装备系列丛书》编审委员会 编

总主编 张 伟

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

机载雷达作为雷达应用领域的一个分支,在战斗机、轰炸机、运输机的火控、轰炸瞄准、气象探测等领域得到了广泛应用,已成为现代空战中计算机控制的机载信息探测和处理系统中的重要组成部分,是机载设备中极为重要的、具有标志性的设备。本书共分为12章,内容包括:机载雷达概述;天线;雷达发射机;雷达接收机;雷达信号处理;雷达数据处理;雷达显示器;机载火控雷达;机载轰炸雷达;机载气象雷达;机载雷达的干扰与抗干扰技术;机载雷达的技术现状和发展趋势。本书密切结合国防现代化和武器装备现代化建设,理论联系实际,深入浅出,对机载雷达技术装备的发展具有积极的推动作用。本书可供机载雷达等领域学习和研究的科研人员、工程技术人员使用,也可作为机关工作人员和对雷达有兴趣的有关人员的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机载雷达装备/《空军装备系列丛书》编审委员会
编. --北京:航空工业出版社,2010.6

(空军装备系列丛书)

ISBN 978-7-80243-552-0

I. ①机… II. ①空… III. ①机载雷达 IV.
①TN959.73

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第099893号

机载雷达装备

Jizai Leida Zhuangbei

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

发行部电话:010-64815615 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2010年6月第1版

2010年6月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:12

字数:282千字

印数:1—4000

定价:36.00元

《空军装备系列丛书》

编审委员会

主任：吕刚 胡秀堂

副主任：张伟

成员：熊笑非 甘晓华 涂剑刚 朱林

张列刚 武维新 朱祝华 刘永坚

费爱国 施明利 刘健文 胡瑜

张勋

《空军装备系列丛书》

编审办公室

主任：王军良

副主任：李廷立

成员：李海亮 韩 枫 梅文华 孙亚力

赵 琼 王子刚 海建和 张国杰

序

空军武器装备是空军诸兵种用于实施和保障战斗行动的武器、武器系统以及与之配套的其他军事技术装备的统称，包括各种战斗装备和保障装备。

空军武器装备的历史不过百年，却谱写了武器装备历史上发展速度最快的篇章。人类翱翔天空的梦想可以追溯到远古时代，但直到1903年才由美国的莱特兄弟首次实现有动力自主飞行，1907年才开始用于军事。不论是在两次世界大战还是冷战时期，飞机及相关技术都显示了突出优势，得到快速发展。空军从辅助兵种发展成独立的战略军种，从从属其他军兵种作战发展到能够担当战略战役主要任务，成为诸军兵种一体化联合作战的主力。空军武器装备也形成了歼击机、强击机、轰炸机、侦察机、运输机、特种飞机、雷达、高炮、地空导弹、空投空降、通信导航等多个装备系列。随着科学技术的发展，精确制导弹药、预警飞机、无人驾驶飞机、电子战装备、数据链、综合电子信息系统、空天防御系统等众多新类别武器装备还在源源不断地加入到空军武器装备行列中来。空军武器装备仍将保持高速发展的势头。

百年之间，空军从无到有，从弱到强。人类社会也从工业时代进入信息时代。战争形态由机械化战争向信息化条件下的高技术战争转变，军队面临着深刻的转型和军事变革。在这个深刻变革的时代，空中力量成为高技术战争的关键因素，空中力量的运用成为影响战争结局的重要环节，空中战争形态仍在以高速率发生变化，空军仍是世界各国军队发展建设的重点。空军在保卫国家安全、维护国家主权、抵御外来侵略、支撑不断拓展的国家利益等方面，都将发挥越来越重要的作用。

纵观世界空军武器装备发展历史，可以看出，战争需求是空军装备发展

的强大牵引力，科学技术进步是空军装备发展的不竭推动力。当今空军武器装备的作战使用，已不是传统概念的单个武器平台对抗，而是敌对双方整个武器装备体系的对抗。按照体系配套思想发展建设武器装备已经成为基本趋势。更加强调空天一体、攻防兼备、平战结合，更加重视发展具有威慑与实战双重功能的武器装备，信息装备由从属地位上升为主战装备，常规武器弹药向精确打击转变，支援保障装备成为联合作战的重要支撑。

武器装备是军队履行使命任务的基本物质基础，是军队现代化水平的主要标志。军事领域的革命性变化，通常始于武器装备的突破性进步。空军武器装备集现代科学技术尖端成果之大成，与国家的政治、经济、文化、社会紧密关联，与百姓生活紧密关联，一向引发人们的广泛兴趣和关注。空军装备研究院组织编写的《空军装备系列丛书》，作者都是空军相关学科的专家学者，不少是本学科的领军人物。该丛书全面系统地介绍了空军装备及相关技术，是一套了解空军装备、学习高科技知识的好读本，对于认识空军在国防和军队建设中的地位与作用，了解空军武器装备的历史、现状和发展趋势，研究探讨空军武器装备发展的特点、规律，引发更多的人把目光投向空军武器装备建设，会起到积极的作用。我曾任空军装备研究院第一任院长，有幸参与了《空军装备系列丛书》的编辑策划工作。衷心希望在中国空军武器装备高速发展的进程中，《空军装备系列丛书》能够发挥其应有的作用。

预祝《空军装备系列丛书》出版发行获得圆满成功！

魏 钢

2007年11月16日

前 言

雷达是通过发射和接收目标反射回来的无线电波，来发现目标和对目标进行定位的电磁系统。自 20 世纪 30 年代雷达发明以来，经过不断的发展和改进，大大地扩展了人们观测周围环境的感受特别是视觉能力，不但能在黑暗、雾霾和雨雪等全天候气象条件下进行观测，还能准确地测量目标的距离、角度、速度等人眼所不能精确获得的目标数据。

雷达在第二次世界大战中曾大显身手，屡建奇功。机载雷达作为雷达应用领域的一个分支，在军用战斗机、轰炸机、运输机的火控、轰炸瞄准、气象探测等领域得到了广泛应用，已成为现代空战中计算机控制的机载信息探测和处理系统中的重要组成部分，是机载设备中极为重要的、具有标志性的设备。

本书共分为 12 章。第 1 章对机载雷达的使命、应用和一般技术基础等方面进行了概述；第 2 章介绍了机载雷达天线；第 3 章介绍了雷达发射机；第 4 章介绍了雷达接收机；第 5 章介绍了雷达信号处理方面的内容；第 6 章介绍了雷达数据处理；第 7 章介绍了雷达显示器；第 8 章对机载火控雷达及其分类作了介绍，并举例介绍了 F-16 飞机上的 AN/APG-66 机载火控雷达；第 9 章介绍了机载轰炸雷达；第 10 章介绍了机载气象雷达；第 11 章对机载雷达的干扰与抗干扰技术进行了介绍；第 12 章阐述了机载雷达的技术现状和发展趋势。

本书第 1 章、第 8 章第 4 节、第 12 章由刘永编写；第 2 章~第 7 章、第 8 章前 3 节、第 9 章由马芳田、刘永编写；第 10 章由赵少波编写；第 11 章由侯民胜编写；全书由刘永、侯民胜统稿。

作者衷心感谢梅文华博士、侯为民高工、王鹏刚高工对本书编写工作给予的支持；感谢空军装备研究院领导对本书出版工作的大力帮助；感谢鲁旭红工程师对本书版面和文字所作的扎实有效的修改。

机载雷达所涉及的技术知识是非常庞大和复杂的，国内外的专家学者已出版了很多卓有建树的论著。本书作者从军事应用的角度来阐述和介绍机载雷达知识，作为雷达工程师和机关工作人员的一般参考书，试图建立一种更加快速有效的机载雷达认知途径。由于作者水平所限，缺点和不足之处在所难免，欢迎批评指正。

编者

2009年10月

目 录

第1章 概述	(1)
第1节 机载雷达任务与使命	(1)
第2节 机载雷达在战争中的典型应用	(3)
一、越南战争	(3)
二、中东战争	(5)
三、海湾战争	(7)
第3节 雷达频段的划分	(8)
一、米波段 (HF、VHF、UHF)	(9)
二、分米波段 (L、S)	(9)
三、厘米波段 (X、Ku、K、Ka)	(10)
四、毫米波段	(10)
五、激光波段	(10)
第4节 机载雷达的体制简介	(10)
第5节 机载雷达的基本组成及工作原理	(11)
第6节 机载雷达的主要战术技术指标	(13)
一、机载雷达的主要战术指标	(14)
二、机载雷达的主要技术指标	(14)
第7节 雷达方程	(15)
第8节 雷达截面积	(16)
第2章 雷达天线	(19)
第1节 概述	(19)
一、雷达天线的作用	(19)
二、天线参数	(19)
第2节 反射器天线	(20)
一、抛物面反射天线	(20)
二、卡塞格伦天线与变态卡塞格伦天线	(21)
三、反射器天线的馈源	(23)
第3节 平面缝隙阵列天线	(24)
一、辐射阵面与辐射波导、馈电波导	(24)
二、馈电与和差网络	(26)

第 4 节 多功能 PD 雷达天线的兼容及馈线网络	(27)
一、变态卡塞格伦天线兼容敌我识别 (IFF) 器天线	(27)
二、平板缝阵天线兼容连续波照射器、敌我识别 (IFF) 器天线	(28)
第 3 章 雷达发射机	(29)
第 1 节 概述	(29)
第 2 节 相参雷达对发射频率稳定性的要求	(29)
第 3 节 主振放大式发射机	(30)
一、行波管简介	(31)
二、双模栅控行波管	(33)
第 4 节 固态发射机	(34)
一、固态发射机的特点	(34)
二、固态高功率放大模块	(34)
三、微波单片集成电路 (MMIC) 收发模块	(35)
四、固态发射机的应用	(36)
第 4 章 雷达接收机	(38)
第 1 节 概述	(38)
一、雷达接收机的分类、组成与功用	(38)
二、雷达接收机主要技术指标	(39)
第 2 节 超外差式接收机	(40)
一、超外差式接收机前端	(40)
二、接收机中频放大器	(43)
三、频率综合器	(45)
第 5 章 机载雷达信号处理	(48)
第 1 节 模拟信号处理	(48)
第 2 节 数字信号处理技术	(51)
第 3 节 快速傅里叶变换技术	(52)
第 4 节 恒虚警技术	(55)
一、参量法 CFAR 处理技术	(55)
二、单元平均 CFAR 处理	(55)
三、对数正态分布的 CFAR 处理	(56)
四、非参量法 CFAR 处理	(57)
五、杂波图 CFAR 处理	(57)
第 5 节 合成孔径与多普勒波束锐化	(58)
第 6 节 地形回避与地形跟随	(60)
一、地形回避	(60)

二、地形跟随	(62)
第 6 章 雷达数据处理	(64)
第 1 节 概述	(64)
第 2 节 机载脉冲雷达的距离测量	(65)
一、脉冲雷达测距原理	(65)
二、数字式距离跟踪	(67)
三、解距离模糊	(69)
第 3 节 机载脉冲雷达的角度测量	(75)
一、角度测量原理	(75)
二、角度误差信号的形成	(78)
三、角度误差信号的变换和放大	(79)
第 4 节 机载脉冲雷达的速度测量	(81)
一、测速原理	(81)
二、解距离和速度遮挡	(82)
第 5 节 多目标跟踪	(83)
第 6 节 坐标变换	(84)
第 7 章 雷达显示器	(87)
第 1 节 概述	(87)
第 2 节 雷达显示器的组成及工作原理	(88)
第 3 节 示波管和彩色显像管	(89)
第 4 节 光栅扫描雷达显示器	(90)
第 5 节 雷达综合显示器	(92)
第 8 章 机载火控雷达	(95)
第 1 节 机载火控雷达的分类	(95)
第 2 节 非相参机载火控雷达	(95)
一、发射机工作原理	(95)
二、接收机工作原理	(98)
三、非相参雷达信号处理电路	(99)
四、非相参雷达的优缺点	(100)
第 3 节 机载 PD 火控雷达	(101)
一、PD 雷达的定义	(101)
二、机载 PD 雷达的杂波频谱	(102)
三、高、中、低脉冲重复频率	(104)
四、PD 雷达的工作原理	(108)
五、机载 PD 火控雷达的主要工作方式	(109)

第4节 AN/APG-66 机载火控雷达	(112)
一、基本组成和物理参数	(113)
二、主要功能和战术技术性能	(113)
三、AN/APG-66 雷达的主要部件	(118)
四、交联关系	(123)
五、雷达各工作方式实现的技术途径	(123)
六、雷达软件功能	(129)
第9章 机载轰炸雷达	(132)
第1节 概述	(132)
第2节 轰炸雷达的组成及特点	(134)
第3节 现代机载轰炸雷达工作方式	(136)
第4节 机载轰炸雷达 XX-3 简介	(138)
一、功能	(138)
二、战术技术性能	(138)
三、组成	(140)
第10章 机载气象雷达	(144)
第1节 气象雷达的功用	(144)
一、探测雷雨和湍流等危险气象区域	(144)
二、观察飞机前下方的地形和发现空中障碍物	(145)
第2节 气象雷达的基本工作原理	(146)
一、气象雷达对气象目标的探测	(146)
二、湍流探测	(146)
三、风切变探测	(147)
四、机载气象雷达的地形识别	(148)
五、气象雷达方程	(149)
六、目标距离及方位的测定	(150)
第3节 气象雷达的组件	(150)
一、气象雷达收发组件	(151)
二、天线组件及雷达罩	(152)
三、显示器及控制盒	(152)
第4节 典型机载气象雷达的技术特性	(153)
一、JYL-6x 气象雷达	(153)
二、WXR-700X 型数字式彩色气象雷达	(154)
三、WXR-700 (FLW) 风切变探测雷达	(154)
四、RDR-4A 雷达系统	(155)
五、RDR-4B 前视风切变探测雷达	(155)

六、PRIMUS-90 彩色气象雷达系统	(156)
七、PRIMUS-708 彩色气象雷达	(157)
第 11 章 机载雷达的干扰与抗干扰技术	(158)
第 1 节 概述	(158)
第 2 节 雷达干扰	(159)
一、雷达侦察	(159)
二、雷达干扰及分类	(160)
三、雷达干扰装备	(160)
四、常用有源干扰技术	(161)
第 3 节 雷达抗干扰技术	(162)
一、波形选择抗干扰技术	(162)
二、功率对抗技术	(163)
三、空间对抗技术	(163)
四、频域对抗技术	(163)
五、极化对抗技术	(163)
六、接收机抗干扰电路	(164)
七、信号数据处理抗干扰	(164)
第 4 节 机载火控雷达抗干扰技术的发展及现状	(164)
第 12 章 机载雷达的技术现状和发展趋势	(167)
第 1 节 机载雷达发展简史	(167)
一、国外机载雷达的发展	(167)
二、国内机载雷达的发展	(171)
第 2 节 机载雷达技术现状	(171)
第 3 节 机载雷达发展趋势和未来展望	(174)
参考文献	(176)

第1章 概述

第1节 机载雷达任务与使命

雷达自20世纪30年代作为探测电离层中物体的科研工具,至今已有70多年的发展历史。今天机载雷达已成为计算机控制的机载信息探测和处理系统中的重要组成部分,是机载设备中极为重要的、具有标志性的设备。

在空间探测中,人们首先认识到脉冲无线电波可以测量目标的距离。雷达是英文Radar (Radio Detection and Ranging 缩写)的音译。原意是“无线电探测和测距”,因此雷达也称为“无线电定位”。随着雷达技术的发展,雷达的功能不仅是测量目标的距离、角度(方位、俯仰),而且还可以测量速度及其他信息。

机载雷达工作时,发射机经天线向空间发射一串重复周期一定的高频脉冲。如果在无线电波传输的路径上有目标存在,雷达就可以接收到目标反射回来的回波。回波信号将滞后发射脉冲一个时间 T_r (电磁波往返于目标和雷达之间的时间),已知电磁波在空间的传播速度为光速 c (约为 $3 \times 10^8 \text{m/s}$),因此,雷达只要测量出回波信号与发射脉冲的滞后时间就可以计算出目标的距离 R ,即

$$R = cT_r/2 \quad (1-1)$$

目标角位置(方位角、俯仰角)的测量是利用天线的方向性来实现的。通常,机载雷达天线用一个一定宽度的笔形波束对空域扫描,当天线对准目标时回波信号最强,目标偏离波束轴线时回波信号减弱,因此,可根据接收回波最强时天线波束的指向,确定目标的方向,这就是早期雷达角位置的测量原理。为了提高测角精度,人们发明了许多新型天线、新的测角方法,如单脉冲测角技术的应用,大大提高了机载雷达测角精度和抗干扰性能,使机载雷达成为火控系统的重要组成部分。

机载雷达的发展不仅依赖于雷达技术的发展,同时也离不开战斗机、轰炸机的战术应用。20世纪50年代,轰炸机在执行战略战术的轰炸飞行时,一般采用高空高速突防方式。60年代之后,为避开地面雷达及炮火的跟踪与攻击,轰炸机开始采用低空突防方式,并以山脉、海浪等作掩护,低空迂回地接近目标。为保证飞行安全,轰炸机上装有地形跟随和地形回避雷达,直到今天美国的B-52、F-111以及B-1B等轰炸机仍以低空突防为主要作战方式。当时与之对抗的战斗机的火控雷达受到较强的地杂波、海杂波的干扰,不能在杂波背景中发现并跟踪目标,因此轰炸机低空轰炸屡屡得手。

雷达工程师们想到了相参技术,即声学中的多普勒效应:当一个目标与雷达之间存在相对运动时,目标回波信号的频率相对发射信号频率会产生一个多普勒频移。利用这个多普勒频移,可从杂波背景中检测出运动的目标,机载脉冲多普勒雷达(PD雷达)

应运而生。

机载脉冲多普勒体制研究始于1951年。美国于1953年研制成功了波马克导弹高脉冲重复频率(HPRF)的PD雷达导引头。于1959年开始研制的AN/AWG-10火控系统 AN/APG-59型PD雷达继承了波马克导弹雷达导引头的PD技术,它是一部高、低脉冲重复频率波形的PD雷达,重量^①450kg,体积0.85m³,生产了100多套,后定名为AN/APG-9型雷达。

由于飞机全高度作战和一些机载武器的需要,机载雷达有时还需要提供运动目标的相对速度参数。早期的雷达通常用目标距离的微分计算相对速度。现代雷达一般用多普勒频移得到更精确的目标相对速度。由于目标与雷达之间存在着相对运动时,接收信号的载频相对于发射信号的载频会产生一个频移,这个频移即为多普勒频移 f_d ,它与相对速度成正比

$$f_d = 2V_r/\lambda \quad (1-2)$$

式中: λ ——雷达波长。

因此,得到多普勒频移就可以求出目标的相对速度了。

现代机载相参雷达分辨率的提高,还为测量目标的尺寸提供了有利条件。如机载PD火控雷达中对地面目标使用的波束锐化(DBS)功能或者合成孔径雷达(SAR),在测量较大的地面建筑物时,其分辨率和精度有很大的提高,精度在3~10m之间。

由于机载计算机和空空导弹的出现,相继研制出以机载雷达为主体的各种火控系统。机载雷达的功能趋于多元化,空/空用于检测目标参数及导弹制导;空/地(海)用于测斜距、地形测绘、地形跟随/地形回避等。但随之而来的是体积、重量的增加,可靠性的下降。20世纪70年代机载雷达技术趋于成熟,数字信号处理、数字数据处理借助微处理机开始应用于机载PD雷达。频率捷变、脉冲压缩、多普勒波束锐化等新体制的不断涌现,使机载雷达真正进入了多波形、多体制、多功能阶段,可靠性也有了明显提高。到80年代,一些西方国家(如美国)新型号研制的速度已经很快,轻型飞机雷达轻型化、组件化,高性能飞机雷达多功能化、软件化。今天的多功能机载PD雷达只有100kg左右。

现代机载雷达主要用于作战、航行和侦察,包括机载火控雷达、航行气象雷达、侦察与遥感领域使用的合成孔径成像雷达等。根据任务性质的不同,要求完成的功能不同。

对于机载火控雷达,要求它们能完成对于空中运动目标的搜索和跟踪,与敌我识别器配合完成对空中目标的敌我识别;能完成载机对地面斜距的测量、地(海)面运动目标的指示、地图测绘和冻结、信标指引等功能。探测到的目标信息要传输给火力和综合武器控制系统,以配合控制导弹的发射和制导、炸弹的投放,以及载机航炮的射击,完成对敌机的攻击和对敌方阵地的轰炸任务。

对于机载航行气象雷达,主要完成飞机航路和空域中的雷电、带雨云团、湍流、风切变等的探测,保障飞机在复杂气象条件下的飞行安全。

^① 本书所提“重量”均为“质量”概念,单位为kg、t等。

我国于20世纪80年代开始研制机载PD火控雷达,80年代末至90年代初开始飞行试验,用了不到20年的时间迎头赶上了世界先进国家40多年的研究。目前,我国新型的机载PD火控雷达已装备部队,并投入作战使用。

第2节 机载雷达在战争中的典型应用

自从莱特兄弟发明飞机之后,随着飞机制造技术的进步和飞行员空中驾驶本领的增强,飞机很快就被用于军事作战。在1911年的墨西哥内战中,飞行员驾驶飞机在空中用手枪相互对射,这可以说是世界上的第一次空战。

雷达自从发明以来,就是与军事和战争紧密相连的。随着1937年第一台机载雷达的问世,飞行员在空中又增加了一件新式武器。它是飞机的眼睛,不但看得远,看得准,而且不受夜间和多云等复杂气象条件的限制;除此之外,还能利用它自动引导武器火控系统对目标进行攻击。

机载雷达用于作战的用途可分为空中侦察、对地轰炸和机载火力控制等方面。空中侦察包括机载预警探测、对地面和海面目标探测等应用;机载火力控制则是由雷达探测和跟踪空中目标,测算目标的距离、相对于载机的方位角和俯仰角,以及目标与载机的相对速度等各种应用于航炮、导弹、炸弹等武器控制的参数,达到引导飞行员和武器控制系统进行战斗并提高武器系统命中率的目的。

一、越南战争

在20世纪60~70年代的越南战争中,越南空军与美国空军在越南上空进行了殊死的搏斗。当时,越南空军主要装备是米格-17和米格-21飞机,美国空军则出动了F-4C、F-105、F-8战斗机和A-1H、A-4、A-6攻击机,以及EB-66干扰机等飞机。

自20世纪50年代起,空空导弹正式装备部队使用,在越南战争的空战中,双方都使用了空空导弹,因此,可以说这是历史上第一次真正的空空导弹战。雷达作为飞机的眼睛和导弹的指路灯,也发挥了应有的作用。

一天,越南空军的2架米格-21飞机从内排机场起飞,直飞越南与老挝的边境上空,飞行高度3000m,准备在越西北地区游猎,伺机对美国空军飞机进行奇袭。到达以往很少发生空战的木州上空后,在2800m高度发现了2架F-105D飞机。这两架美机正在直线飞行,对周围完全没有戒备。越方长机利用光学瞄准具瞄准,在高度3000m、速度1000km/h,判断敌目标机距离为1200m,飞行员马上发射了1枚苏制K-13红外制导导弹,美机中弹起火坠落。与此同时,2号机利用机载雷达对另一架F-105D飞机进行测距瞄准,在探测距离为4000m时发射了1枚导弹,结果导弹在美机机腹下右侧爆炸,没有击中目标。接下来,在同样的高度、速度,两机距离1000m时,飞行员又发射了第二枚导弹,直接命中了F-105D的机尾,将其击落。空战结束后,越方2架