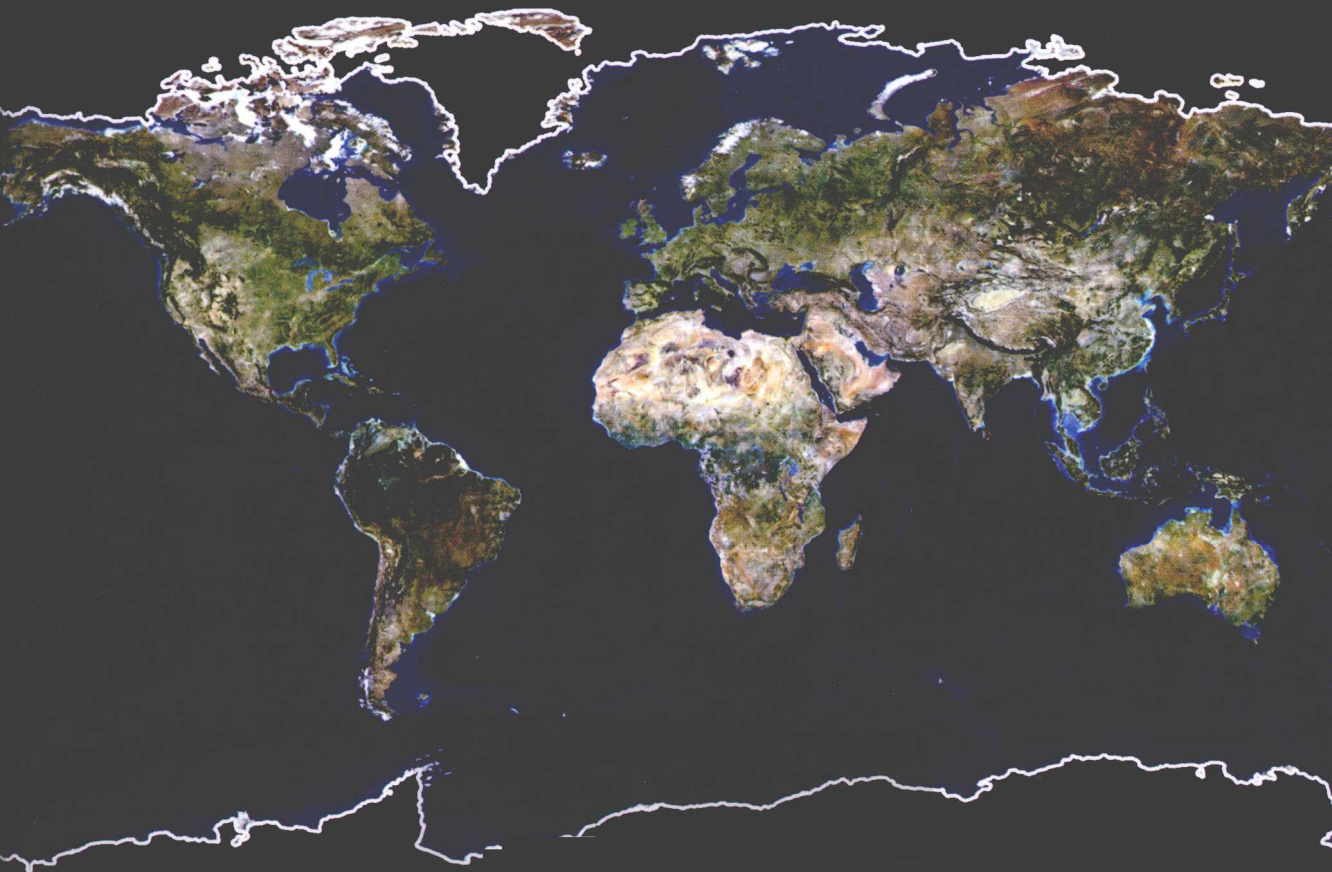




“十二五”国家重点图书出版规划项目

空间射频信息获取新技术丛书



机载与星载雷达系统导论

Air and Spaceborne Radar Systems: An Introduction

【法】Philippe Lacomme Jean-Philippe Hardange Jean-Claude Marchais Eric Normant 著

王俊 孙进平 洪文 等译

毛士艺 审校

“十二五”国家重点图书出版规划项目
空间射频信息获取新技术丛书

机载与星载雷达系统导论

Air and Spaceborne Radar Systems: An Introduction

Philippe Lacomme
[法] Jean-Philippe Hardange 著
Jean-Claude Marchais
Eric Normant

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书重点介绍了现代机载与星载雷达的历史、主要原理、功能、模式、性能与特性。全书由五个部分组成：第一部分讲解了雷达的一般原理，包括基本原理与实际任务需求分类、雷达方程、传播、噪声与欺骗信号、点目标检测等；第二部分介绍了目标检测与跟踪，包括杂波对消，以及对空中目标、地面目标和海面目标的检测与跟踪，同时分析了电磁干扰环境；第三部分讨论了地面测绘与成像，包括 SAR 及 ISAR 技术，以及毫米波雷达、散射计和高度计等观测雷达技术；第四部分介绍了雷达系统的主要应用和任务；第五部分分析了未来机载与星载雷达技术的发展趋势和相关原理。

本书非常适于作为雷达工程师的专业培训教材使用，同时可作为雷达系统工程师和系统高级用户的参考书，也适合作为相关专业的研究生教材。

Air and Spaceborne Radar Systems; An Introduction

ISBN: 978-1891121135

Copyright ©2001 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN: 978-9812724021

Copyright ©2011 by Elsevier(Singapore)Pte Ltd. All rights reserved.

Printed in China by Publishing House of Electronics Industry under special arrangement with Elsevier(Singapore)Pte Ltd.

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier(Singapore)Pte Ltd. 授予电子工业出版社在中国大陆境内(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)出版。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 公司防伪标签，无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字：01-2009-3833

图书在版编目(CIP)数据

机载与星载雷达系统导论/(法)拉科姆等著;王俊等译. —北京:电子工业出版社, 2011.7

(空间射频信息获取新技术丛书)

书名原文: Air and Spaceborne Radar Systems; An Introduction

ISBN 978-7-121-13752-5

I. ①机… II. ①拉… ②王… III. ①机载雷达-高等学校-教材 ②卫星载雷达-高等学校-教材
IV. ①TN959.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 104521 号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 冯小贝

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市桃园装订有限公司

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 × 1092 1/16 印张: 21.5 字数: 550 千字

印 次: 2011 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 59.00 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，联系及邮购电话：(010)88254888。

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

服务热线：(010)88258888。

译 者 序

作为一种主动航天、航空遥感手段，微波成像技术具有全天时、全天候工作的特点，在环境保护、灾害检测、海洋观测、资源勘查、精细农业、地质测绘和政府公共决策等方面有着广泛的应用，目前已成为高分辨率对地观测和全球资源管理的最重要手段之一。以其中的典型代表——合成孔径雷达(SAR)技术为例，经过三十余年的研究和发展，我国在系统研制、数据获取、信息处理及遥感应用方面取得了一系列重大的技术突破和丰硕的科研成果。

微波成像技术国家重点实验室主要从事以合成孔径雷达技术为代表的微波成像新概念、新体制和新方法的研究。为持续跟踪国际最先进微波成像技术的发展动态，实验室组织开展了外文著作系列翻译工作。鉴于目前 SAR 系统以机载和星载平台为主，实验室挑选本书作为译著系列中有关 SAR 系统工程研究方面的入门教材。本书作者是法国工业界的著名雷达技术专家，长期从事各型机载雷达的设计工作，且具有丰富的教学及培训经验。因此与已有的雷达技术基础或导论性著作相比，本书具有密切结合工程实践的特点。不仅对各主题内容给出了详细而精练的理论处理，也提供了系统级的工程理解。读者不仅可以了解到如何根据具体应用及任务的不同来设计雷达，也可以学习如何在设计阶段考虑各种可行的系统和性能参数。本书由五个部分组成，第一部分为雷达原理，包括基本原理与实际任务需求分类、雷达方程、传播、噪声与欺骗信号、点目标检测等；第二部分为目标检测与跟踪，包括杂波对消，以及对空中目标、地面目标和海面目标的检测与跟踪，同时分析了电磁干扰环境；第三部分为地面测绘与成像，包括 SAR 及 ISAR 技术，以及毫米波雷达、散射计和高度计等观测雷达技术；第四部分介绍了雷达系统的主要应用和任务；第五部分分析了未来机载与星载雷达技术的发展趋势和相关原理。本书非常适于作为雷达工程师的专业培训教材使用，同时可作为雷达系统工程师和系统高级用户的参考书，也适合作为相关专业的研究生教材。需要说明的是，本书中译版是以英文版为基础翻译的，并参考了法文版，同时也完成了原版的勘误和修订。

微波成像技术国家重点实验室负责译著系列的选书和翻译的组织工作。北京航空航天大学的王俊、孙进平、胡睿、李翠平、任毅、毕越凯、翟国芳、吕燕、武鹏等完成了本书的翻译工作。洪文、孙进平完成了本书的校译工作，并由毛士艺教授对全书进行了终稿审定。本书的翻译还得到了中国科学院电子学研究所、北京航空航天大学、南京电子技术研究所多位专家学者的指导和帮助。需要说明的是，本书中译版的首要原则是准确传达原著的学术观点。鉴于译者的经验和时间约束，翻译过程中难免存在未尽和疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

序 言

机载雷达的历史几乎和雷达本身的历史一样悠久。早在二次世界大战期间，就已实现了由机载平台改善雷达的探测距离，与此同时，谐振腔式磁控管技术的发展使得雷达可以工作在更高的频率上，由此定向天线得以应用。如今机载雷达具有种类繁多的功能：从导航、气象用途到军用飞机上有关监视、武器投放的专门用途。在诸如相参动目标指示与合成孔径雷达等处理技术发展的同时，伴随着技术上的巨大进步，如数字处理、固态相控阵等。近几十年来，用于地球物理环境监测与监视应用的星载雷达也取得了很大的发展。

本书将有关雷达主题的详细理论分析和系统级工程理解相结合，这是本书的特点所在，并且对于雷达业界的技术推动有极大的潜在价值。本书在结构上结合大量的雷达基本原理，讨论了各种应用与任务，分析了如何设计雷达以适应具体的应用及任务。最后几章专门介绍未来的技术发展前景，以及针对新的目标类型与任务，机载与星载雷达可预期的发展方向。法国雷达工业界在机载与星载雷达发展的诸多技术革新中，扮演了重要的角色。本书作者是领域内公认的专家，他们以独特的欧洲视角阐述了该主题。

基于上述理由，对于广大读者来说，这是一本非常有价值的书，既可作为雷达工程师和负责机载、星载雷达系统规格及采购人员的参考书，又可作为研究生的雷达课程教材。

Hugh Griffiths

伦敦大学教授

IEE PGEL5 委员会、IEEE 雷达系统专家咨询组委员

前 言

半个多世纪以来，应用雷达已成为监视活动的一个不变特征。雷达可以不受气候条件与光照的影响进行监视，同时其探测距离远与角度覆盖范围大的特点，使之成为大范围连续监视的至关重要的工具。在过去的五十年里，雷达运行能力与性能得到了持续发展，可以断言，在未来的几十年中，雷达性能将会得到更大的改善。

本书主要介绍机载与星载雷达，避免采用纯理论化的方式，当然也非针对专家学者。准确地说这是一本实用的工具书，我们希望本书能对技术人员、助理工程师及正在从事雷达研发的工程师有较大的帮助。本书也适合于雷达用户、系统工程师与设计人员。

机载与星载雷达系统本身就很复杂，而且必须安装在运动且经常快速变化的平台上，这些平台同时安装有很多其他的设备，因此不能将雷达视为一个独立的个体。雷达的设计必须考虑与整个系统及周围密集电磁环境的兼容性，当然最重要的是满足工作要求。

雷达技术正以日新月异的速度发展，因此本书只能是简要阐述。不过我们在描述下一代雷达时，考虑了主要的发展趋势，因其可行性在很大程度上将依赖于这些新的进展。

本书分为五个部分：

- 一般原理
- 目标检测与跟踪
- 地图测绘与成像
- 主要应用
- 未来的雷达

在概述雷达历史之后，回顾了雷达的主要原理，并对现代机载雷达系统的功能、模式、性能与特性进行了详细研究。接着，本书详述了当飞机或卫星执行任务时，雷达在任务系统中所起的作用。第四部分包含了雷达设计的各种可能性及所受到的限制与约束。最后一部分则描述了任务需求的变化与技术发展的潜在推动，以及未来雷达的发展方向。

备注

鉴于机载与星载雷达通常用于军事应用，为执行保密条例，本书将避免引用现有正在开发或已装备的系统或设备。因此所举事例均基于物理学规律（即领域内公开的信息）与假想“设备”。

目 录

第一部分 一般原理

第 1 章 雷达历史及基本原理	3
1.1 历史	3
1.2 基本原理	4
第 2 章 任务需求的初步说明	11
2.1 引言	11
2.2 任务	11
2.3 平台与武器	13
2.4 系统功能	14
2.5 飞行状态定义	15
第 3 章 雷达方程	16
3.1 引言	16
3.2 信号发射与接收	16
3.3 自由空间的雷达方程	17
3.4 目标的雷达散射截面	18
3.5 接收信号的数学模型	21
3.6 波达方向与单脉冲测量	23
第 4 章 传播	25
4.1 引言	25
4.2 地面的作用	25
4.3 对流层的作用	29
4.4 其他现象	31
第 5 章 噪声和杂散信号	32
5.1 引言	32
5.2 热噪声	32
5.3 辐射噪声	34
5.4 干扰回波与杂波	35
第 6 章 点目标检测	40
6.1 引言	40
6.2 最佳接收机(白噪声)	40

6.3	已知非白噪声下的最佳接收机	46
6.4	未知非白噪声下的自适应接收机	47
6.5	空时自适应处理	50
6.6	波形与模糊函数	51

第二部分 目标检测与跟踪

第7章	杂波消除	59
7.1	引言	59
7.2	波形选择	59
7.3	改善因子与谱纯度	69
7.4	动态范围与线性度	76
第8章	空-空检测	78
8.1	引言	78
8.2	非相参低 PRF 模式	78
8.3	脉冲压缩雷达	86
8.4	低 PRF 多普勒雷达 (MTI)	88
8.5	高 PRF 雷达	92
8.6	脉冲多普勒模式 (高 PRF 与中 PRF)	97
第9章	空中目标跟踪	106
9.1	引言	106
9.2	平台运动及高度坐标系	106
9.3	单目标跟踪 (STT)	107
9.4	绘图跟踪	110
9.5	扫描时跟踪 (TWS)	112
第10章	地面目标检测与跟踪	113
10.1	引言	113
10.2	强对比度目标的检测与跟踪	113
10.3	地面运动目标的检测与跟踪	113
第11章	海面目标检测与跟踪	116
11.1	海面监视雷达	116
11.2	搜索策略	116
11.3	海面舰船检测	118
11.4	小目标检测 (潜望镜)	119
11.5	海面目标跟踪	121
11.6	海面目标分类	123

第 12 章 电磁干扰	124
12.1 引言	124
12.2 电磁兼容	124
12.3 来自其他雷达组件的干扰	125
12.4 平台的设备间干扰	127
12.5 无意的交互影响	128

第三部分 地图测绘与成像

第 13 章 地图测绘	133
13.1 引言	133
13.2 主要参数	133
13.3 单脉冲锐化地图测绘	136
第 14 章 雷达成像	137
14.1 成像雷达应用	137
14.2 图像质量	137
14.3 获得距离分辨率的专门技术	147
第 15 章 合成孔径雷达	155
15.1 设计原理	155
15.2 SAR 模糊	164
15.3 星载 SAR	166
15.4 SAR 工作模式	171
第 16 章 合成孔径雷达的技术细节	174
16.1 徙动	174
16.2 相位误差	174
16.3 平台运动	179
16.4 谱纯度	185
16.5 信号处理	187
16.6 自聚焦	193
16.7 功率预算	206
16.8 定位精度	208
16.9 其他处理方法	211
第 17 章 逆合成孔径雷达 (ISAR)	216
17.1 目的及应用	216
17.2 对 ISAR 的初步说明	216
17.3 海面舰船成像	218

第 18 章 其他观测雷达	221
18.1 毫米波雷达	221
18.2 散射计	222
18.3 高度计	224

第四部分 主要应用

第 19 章 雷达应用及任务	229
19.1 民事应用	229
19.2 军事应用	229
19.3 应用举例	230
第 20 章 设计概述	244
20.1 基本方程	244
20.2 通用雷达配置	246
20.3 天基观测雷达	246
20.4 空中监视雷达(AEW)	249
20.5 海面监视雷达	252
20.6 战场监视雷达	254
20.7 截击雷达	257
20.8 战术支援雷达	260
20.9 突防雷达	264
第 21 章 多功能雷达	266
21.1 引言	266
21.2 雷达模式与功能	266
21.3 技术特点	269
21.4 技术说明	269
第 22 章 技术发展	271
22.1 引言	271
22.2 技术发展的主要阶段	271
22.3 先进的雷达组件	274
22.4 空间技术	282

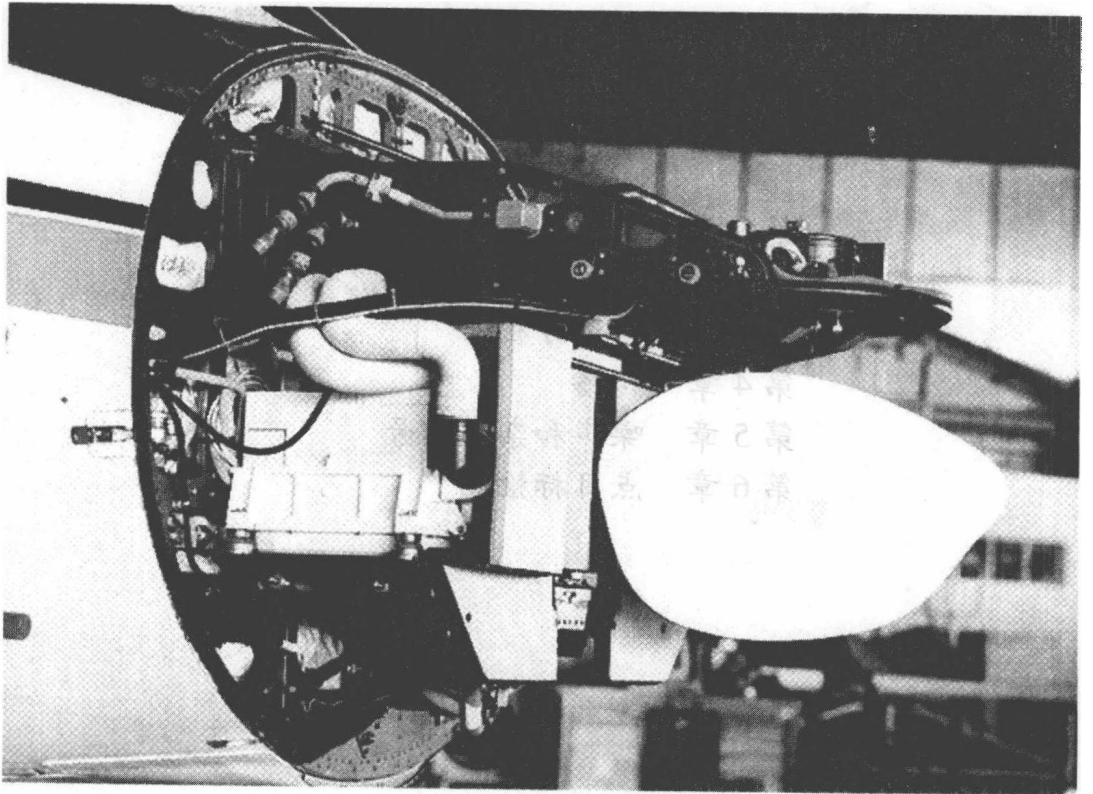
第五部分 未来的雷达

第 23 章 改变着的目标	287
23.1 引言	287
23.2 电磁特征	287

23.3	雷达散射截面	287
23.4	缩减电磁特征	291
23.5	结论	293
第 24 章	任务需求变化	294
24.1	引言	294
24.2	RCS 值	294
24.3	探测距离	294
24.4	自保护距离	295
24.5	任务	296
第 25 章	当前雷达的主要限制	297
25.1	引言	297
25.2	物理限制	297
25.3	技术限制	300
第 26 章	电子式指向天线	302
26.1	引言	302
26.2	机载 ESA 雷达的功能及技术优势	302
26.3	有竞争力的 ESA 方案	305
26.4	总结:机载雷达的 ESA 方案	308
第 27 章	机载与星载雷达性能增强	309
27.1	引言	309
27.2	应对目标 RCS 的缩减	309
27.3	对抗电磁威胁	311
27.4	多目标及演变目标;角度覆盖	312
27.5	天基成像雷达	313
第 28 章	总结	315
	缩略语	317
	符号表	321
	参考文献	324
	作者简介	329

第一部分 一般原理

- 第1章 雷达历史及基本原理
- 第2章 任务需求的初步说明
- 第3章 雷达方程
- 第4章 传播
- 第5章 噪声和杂散信号
- 第6章 点目标检测



海上巡逻雷达(OCEAN MASTER)

第 1 章 雷达历史及基本原理

1.1 历史

1887 年德国物理学家海因里希·赫兹(Heinrich Hertz)证实了电磁波的存在,并证明了它和光波有着同样的性质,因此电磁波也叫做“赫兹波”。

早在 20 世纪初,美国的 Telsa 和德国的 Hülsmeyer 就提出了用无线电波来探测目标的设想。

雷达(RADAR; Radio Detection And Ranging, 无线电探测和测距)的机理基于电磁波的传播,更确切地说,是基于射频(RF)电磁波的传播。美国科幻之父 Hugo Gernsback 早在 1911 年就描述了它的工作原理。1934 年法国科学家 Pierre David 首次成功地用雷达探测到了飞机。1935 年 Maurice Ponte 和 Henri Gutton 在大西洋轮船总公司船队的俄勒冈号上用波长(λ)为 16 cm 的无线电波探测到了冰山。1936 年德国的 Kunhold 教授也探测到了飞机。

作为昼夜都能侦测敌军的理想技术,雷达在第二次世界大战中得到了广泛的应用。早在 20 世纪 40 年代,英国皇家空军就在 Watson Watt 的领导下建成了一套由地面雷达组成的密集网络,为其在最佳条件下部署战斗机提供了充分的预警,不列颠之战英国最终获胜与此密不可分。1942 年起,德军也建立了自己的地面雷达网,用于将探测到的目标位置传回战斗机控制中心。为了拦截并击落夜间来袭的盟国轰炸机群,德国飞行员用日间战斗机攻击由地面探照灯跟踪到的盟国战斗机,或者使用装备了雷达的夜间战斗机进行攻击。

第一架装备了机载雷达的实用战斗机是 1941 年的德制梅塞施密特式(Messerschmitt) Me 110 G-4 型战斗机。其德津风根(Telefunken)雷达 FUG 212 采用由机头外边的许多偶极子组成的庞大天线。截至 1944 年 6 月,德国空军共有 400 架以上的战斗机装备了这种雷达,由于载机飞行高度的限制,其作用距离约为 5 km。

1944 年美国海军航空部队装备了右翼下加装雷达吊舱的海盗式战斗机,而美国空军则拥有装备 Western Electric 公司雷达系统的诺思罗普(Northrop)P-61A 黑寡妇战斗机。

1943 年 7 月 24 ~ 25 日夜间,800 架英国皇家空军轰炸机突袭了汉堡。在此次突袭中,轰炸机首次投下了可用于实战的箔条弹(金属条,其尺寸取决于需要干扰的雷达波段)。该行动致使德军的地面及机载雷达由于探测到的目标过多而陷入全面瘫痪。这标志着电子战的开端。

雷达操作员注意到木制的英制蚊式战斗机和日制零式战斗机特别难于探测,它们就是原始的隐形飞机。

1943 年,装备了雷达的盟军水面舰艇用于探测德军潜水艇的通气管,因此给德国海军带来了沉重的打击。

随后,雷达技术发展过程中的主要阶段有

- 脉冲压缩雷达(20 世纪 60 年代早期)
- 脉冲多普勒雷达(20 世纪 60 年代后期)

- 数字雷达(20 世纪 70 年代)
- 中 PRF 雷达(20 世纪 70 年代后期, 80 年代早期)
- 多模式可编程雷达(20 世纪 80 年代中期)
- 机载电子扫描天线雷达(20 世纪 90 年代)

地球的第一幅雷达图像是由美国 Seasat 卫星上工作在 L 波段($\lambda \approx 30$ cm)的合成孔径雷达获得的。无论昼夜, 该图像的分辨率均可达 25 米。

1.2 基本原理

雷达是在指定方向发射电磁波, 然后接收此方向上障碍物所反射回波的系统。

1.2.1 基本配置

图 1.1 给出了最基本的雷达结构。其组成包括: 发射部分, 发射机将连续正弦波送至发射天线; 接收部分, 接收天线加高增益接收机, 以及检波器。检波器的输出信号由雷达显示器(如 CRT)来显示。

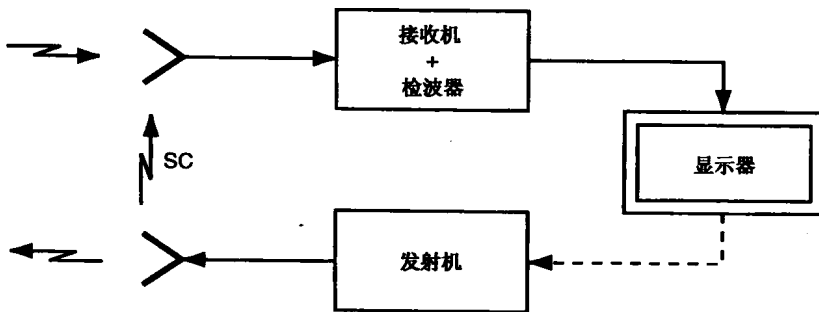


图 1.1 雷达基本电路 1

发射天线的作用是把能量集中起来并向空间中的选定方向(波束中心)发射。发射天线的增益 G_t 沿轴向最大且随方向变化(见第 3 章)。

接收天线则用来收集同一选定方向上目标的后向散射能量, 其增益为 G_r 。假设这两种天线是相同的, 则 $G_t = G_r$ 。

所发射的电磁波以光速传播至目标并由目标反射回来。对于非磁性的介质, 有下式成立:

$$c = \frac{299.7925 \times 10^6}{(K_e)^{1/2}} \text{ m/s}$$

真空中的介电常数 K_e 为 1。在空气中其值随温度、空气成分及气压的不同有微小变化。海平面上的值为 1.000 536。在雷达的实际应用中, 光速一般取为 300 000 km/s。

为确保接收通道只检测由障碍物或目标后向散射的信号, 就必须将其与发射通道解耦。无论采用的是何种技术, 天线都具有包含主瓣、旁瓣和远旁瓣的方向图(见图 1.2)。

对于图 1.1 所示的雷达, 尽管两天线工作在同一方向, 但存在着泄漏, 此例中源于远旁瓣的存在。例如, 假设两天线的远旁瓣比主瓣(沿波束中心)处的最大电平低 40 dB, 则二者的隔离度为 80 dB。在此条件下, 只有当接收通道接收到的障碍物后向散射信号强于寄生耦

合产生的信号时,才能探测到障碍物。实际中还有许多其他因素在起作用,这些因素将在后面讨论,特别是在第3章。

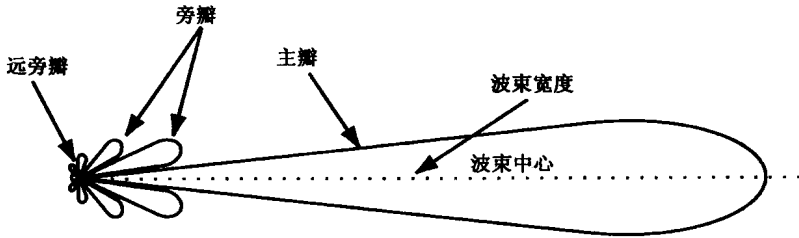


图 1.2 天线波瓣图

图 1.1 所示的雷达是一种双站系统。尽管发射装置和接收装置在空间相邻,但物理上并不重叠。这一常用概念(例如用于发射半主动式导弹)将会在后续章节阐明。

1.2.1.1 测距

如果雷达发射的是频率为 f_0 的纯连续波,则不管距离多远,后向散射回波都具有相同的频率(假设雷达与目标的相对速度为零)。然而,目标的距离越远,雷达散射截面(RCS)越小,接收的信号就越弱。RCS 用于表征目标的后向散射系数。

目标距离可以通过以下几种方法得到:

- 计算目标回波与发射波之间的时差
- 对于线性调频,计算目标回波与发射波之间的频差
- 计算两种不同频率发射波的回波之间的相差(见 8.6 节)

以下部分概述了前两种方法。

时间测量

为了通过计算目标回波与发射波之间的时差得到目标距离,雷达信号须以短脉冲的形式发射出去,如图 1.3 所示。

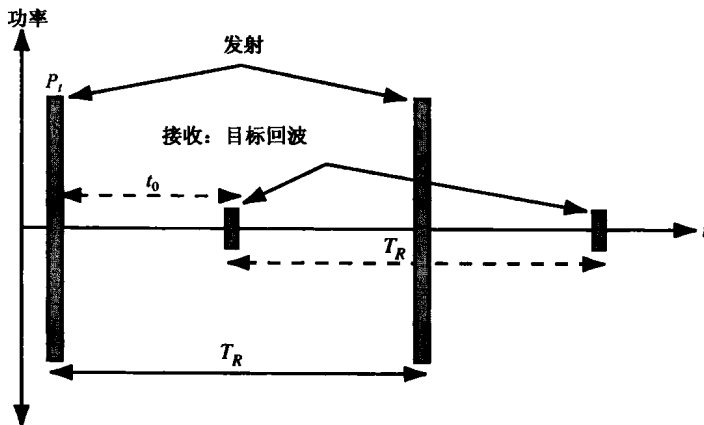


图 1.3 脉冲调制

采用这种发射方式的雷达称为“脉冲雷达”。这种雷达周期性地发射峰值功率为 P_t 的微波。两个脉冲之间的时间间隔称为脉冲间歇周期 T_R 。在此情况下,时间量测值 t_0 就等于微波在雷达与目标间传播一个来回的时间,从而可以得到雷达与目标之间的距离 R 。

注意到发射波的频率对测量没有影响, 可得下式:

$$R = \frac{c \cdot t_0}{2}$$

频移测量

为了通过计算发射波与目标回波之间的频差来获得雷达与目标之间的距离, 发射波必须是线性频率调制的(见图 1.4)。

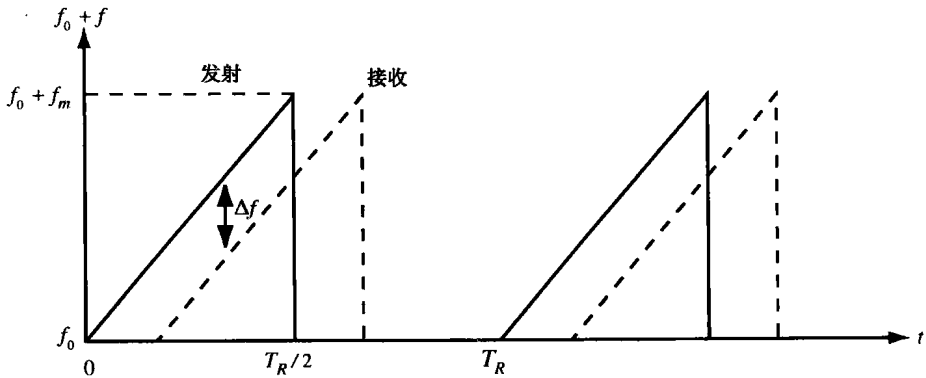


图 1.4 线性调频发射

忽略多普勒效应, 则雷达与目标之间的距离可由下式给出:

$$R = c \cdot \frac{T_R}{2} \cdot \frac{\Delta f}{f_m}$$

其中

f_m = 最高调制频率

Δf = 发射频率与接收频率之间的频差

$c \cdot T_R/2$ = 无距离模糊的距离范围

例如, $T_R = 100 \mu\text{s}$, $\Delta f = 0.2f_m$, 则 $R = 3 \text{ km}$ 。

1.2.1.2 单站雷达的发明

通过控制雷达以脉冲通断方式工作, 使得发射和接收共用同一个天线成为可能。在发射过程中, 必须保护输入接收通道的高灵敏度信号, 使之不受大功率发射电平的影响, 这样可以避免接收电路的饱和甚至损坏。图 1.5 为该解决方案的基本结构图。其中环形器是一种特制的微波电路, 它可使能量由(1)传至(2)但不传至(3), 也可由(2)传至(3)但不传至(1)。要使其正常工作, 每对终端处的负载阻抗必须等于其特征阻抗。在(1)中, 入射信号由发射机产生并传给天线, 但也有极少部分会传至(3), 即接收机的输入端。这缘于环行器的非理想及负载的不完全匹配, 例如天线上的部分反射(驻波比, SWR)。这一点对于由(2)传到(3)及由(3)传到(1)也同样成立。实际的隔离保护可达 30 dB。

在此情况下, 如果发射机提供 100 kW 的峰值功率, 则接收机输入端的传输电平(峰值 100 W)也可能超过限度, 从而导致接收电路饱和或损坏。因此需要采用其他额外的保护措施。该保护装置位于接收机输入端, 且须与发射机同步。它可由预电离气体管和/或半导体二极管构成。和磁控管发射机一样, 这种环形器/保护装置常用无源微波器件, 称为双工器(结合了魔 T 和环形器), 可发射-接收(TR)及反向发射-接收(ATR)(Bentéjac 1992)。