

# 雷达能量战与 隐身技术的挑战

Radar Energy Warfare  
and The Challenges of  
Stealth Technology

[美] 巴赫曼·佐胡里 (Bahman Zohuri) 著

谢恺 李俊 王锐等译



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

# 雷达能量战与隐身技术的挑战

[美] 巴赫曼·佐胡里(Bahman Zohuri) 著  
谢 恺 李 俊 王 锐 等译



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

## 内容提要

本书主要介绍雷达电子战与隐身技术的最新发展,全书共分为4章,包括雷达的作用、分类、技术参数、多种形式的雷达方程等雷达的基本原理,电子对抗与反对抗的概念及发展现状,雷达吸波材料的分类和雷达截面积的计算方法以及如何破解隐身飞机的一些手段,隐身技术相关理论,分析了隐身技术的优缺点和未来发展趋势以及介绍了龙勃透镜、高超音速武器、雷达信号处理基础和单多基地雷达等。

本书可作为雷达与电子战领域从事研究的技术人员的参考资料,也可作为高等院校相关专业教师和学生的教学参考书。

First published in English under the title  
Radar Energy Warfare and the Challenges of Stealth Technology  
by Bahman Zohuri  
Copyright © Springer Nature Switzerland AG, 2020  
This edition has been translated and published under licence from  
Springer Nature Switzerland AG.  
上海市版权局著作权合同登记号:图字:09-2020-779

## 图书在版编目(CIP)数据

雷达能量战与隐身技术的挑战 / (美) 巴赫曼·佐胡里 (Bahman Zohuri) 著; 谢恺等译. —上海: 上海交通大学出版社, 2022.6  
ISBN 978-7-313-26270-7

I. ①雷… II. ①巴… ②谢… III. ①隐身技术  
IV. ①TN974

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 263360 号

## 雷达能量战与隐身技术的挑战

LEIDA NENGLIANGZHAN YU YINSHEN JISHU DE TIAOZHAN

著者: [美] 巴赫曼·佐胡里 (Bahman Zohuri)

译者: 谢恺 李俊 王锐等

出版发行: 上海交通大学出版社

地址: 上海市番禺路951号

邮政编码: 200030

电话: 021-64071208

印制: 当纳利(上海)信息技术有限公司

经销: 全国新华书店

开本: 710 mm×1000 mm 1/16

印张: 19.25

字数: 375千字

版次: 2022年6月第1版

印次: 2022年6月第1次印刷

书号: ISBN 978-7-313-26270-7

定价: 138.00元

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-31011198

主译：谢 恺 李 俊 王 锐

译者：范 斌 吴 坤 陆珊珊  
胡 磊 戴文瑞 秦鹏程

审校：孙吉红 武昕伟

# 译者序

在雷达与电子对抗领域中,能量是一条重要的技术主线。Bahman Zohuri 博士的《雷达能量战与隐身技术的挑战》直指雷达探测目标的能量本质特征,首次提出“能量战”,从雷达基础、电子对抗基础、雷达散射截面积基础以及隐身技术等角度,深入浅出的讲述了雷达能量战与反隐身技术的发展。在日新月异的电子信息领域,本书对相关科研人员学习雷达及电子对抗领域的专业知识具有很强的指导意义。

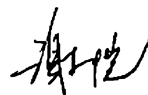
本书第1章以雷达方程为主线讲解了雷达基础知识,介绍了多种雷达方程和雷达系统;第2章介绍了电子支援、电子干扰与电子反对抗等电子对抗基础知识,与第1章形成了对应;第3章介绍了雷达吸波材料、雷达散射截面积以及几种国际典型的新型防空系统;第4章则介绍了隐身技术的发展;附录中介绍了龙勃透镜、高超音速武器、雷达信号处理和单多基地雷达等。书中详细介绍了最新的雷达探测技术、隐身与反隐身技术,其中德国利用无源雷达对 F-35 隐身飞机探测百余公里等实例属首次披露。

本书主要由中山大学谢恺副教授和陆军炮兵防空兵学院李俊副教授、王锐副教授组织翻译,陆军炮兵防空兵学院的陆珊珊、吴坤、范斌、胡磊、戴文瑞、秦鹏程等老师也参与了翻译。其中,谢恺和王锐共同翻译了第1章、李俊翻译了第2章、范斌翻译了第3章、胡磊和戴文瑞翻译了第4章、吴坤和陆珊珊翻译了附录、秦鹏程对全书进行了统稿。翻译过程中,译者团队对许多专有名词做了反复的推敲,力求准确,同时根据国内习惯对全书的符号体系做了梳理和统一,以便读者更好地把握书中内容。现将本书推荐给对该领域感兴趣的读者,本书既可为

## 002 雷达能量战与隐身技术的挑战

雷达技术研究者提供珍贵的参考,也可为电子对抗领域研究者提供必要的专业知识支撑。

书中难免出现纰漏之处,敬请广大读者批评指正。

A handwritten signature in black ink, appearing to be '李屹' (Li Yi).

2022年2月

# 前 言

莱特兄弟发明了飞机,改变了旅行、探险和战争的方式。在第一次世界大战和第二次世界大战中,人们通过一套试验系统有效完成了识别和打击目标的任务。在不列颠之战中,英国皇家空军使用该系统抵御了德国空军的攻击,保卫了国土安全。越南战争期间,美军飞行员大量使用了地对空导弹,在这些战例中,雷达和电子干扰系统发挥了巨大的作用,相关技术一直沿用至今。

相较于莱特兄弟最初的设计,飞机在设计和功能方面已经取得了极大地进步,如最先进的第六代战机:美国的 F-35、俄罗斯的苏-57,以及中国的歼-20,为了避免被雷达发现,它们需要攻克一个共同的技术挑战即实现隐身。问题是真的能像其生产者声称的一样,通过吸波材料和减小雷达截面积来减小对空间中雷达搜索电磁波的反射吗。

针对新一代高速喷气式飞机最有效的电子对抗手段是基于数字射频存储器的中继干扰机和应答机。而本书提出将利用量子电动力学(QED)方法,从麦克斯韦方程(MCE)中导出的标量波来对抗超高速武器的攻击。

本书以一种通俗易懂的方式介绍了标量波雷达基本原理,通过完整地复制雷达波形,从而在目标接收机和火控雷达信号处理机中制造大量的假目标。

需要关注的是目标回波中存在中频噪声,众所周知,飞机上的火控雷达是典型的脉冲多普勒雷达,主要实现空空或空地探测,特点是体积小、质量轻。为在复杂环境中提高探测范围、实现多目标跟踪、减小机载人员任务量,其自动化程度很高。战略隐身战斗机必须在更高的 C、X 和 Ku 频段实现隐身,一旦频率波长超过一定的阈值,飞机反射信号就会发生阶跃变化,当飞机的尾翼或其他部件尺寸小于特定

频率波长的 8 倍时就会产生共振效应。由于隐形战斗机对尺寸和重量的要求,使得它难以覆盖两英尺以上的吸波涂层,因此只能在特定频率实现隐身。

一些工作在 S 或者 L 波段的低频雷达,能够探测、跟踪到部分隐身飞机。为了应对工作在 UHF 和 VHF 波段的低频雷达,美国国家航空航天局为 B-2 或 B-21 设计了两个大的飞翼,设计师希望通过对飞机的雷达截面积的特殊设计,使其避免被发现。

此外,低频雷达可以用来辅助火控雷达,一些国家早已开始发展低频雷达,然而当前的研究仅存在于理论,离部署使用还有一定的距离。

以上为本书主要内容,为了使不同层次的读者能够掌握隐身技术,我们认真设计了每一个主题。同时本书为雷达对抗和隐身技术的初学者提供了相关基础知识的附录。

Bahman Zohuri

美国新墨西哥州阿尔伯克基

# 目 录

第 1 章 雷达基础 .....	001
1.1 引言 .....	001
1.2 最早的雷达原理概念和实验 .....	004
1.3 雷达的类型 .....	006
1.4 雷达基础、脉冲重复频率和脉冲重复时间 .....	030
1.5 相移计算 .....	038
1.6 脉冲重复频率参差 .....	046
1.7 多脉冲重复频率 .....	047
1.8 雷达能量是什么 .....	049
1.9 电磁能量的传播和脉冲容积 .....	054
1.10 雷达距离方程 .....	060
1.11 雷达方程的其他形式 .....	065
1.12 海杂波抑制 .....	069
1.13 雨杂波 .....	070
1.14 干信比：恒功率(饱和)干扰 .....	072
1.15 干信比(单基地) .....	076
1.16 单向空间损耗的干信比计算(单基地) .....	077
1.17 自卫干扰与双基地雷达的干信比 .....	078
1.18 干信比(双基地) .....	079
1.19 双基地干信比计算 .....	080
1.20 标准干信比计算示例(单基地恒功率干扰) .....	080
1.21 毫米波雷达方程 .....	081

<b>第 2 章 电子对抗与电子反对抗</b> .....	086
2.1 引言 .....	086
2.2 信号情报的含义 .....	087
2.3 电子战支援 .....	090
2.4 电子对抗 .....	092
2.5 电子反对抗 .....	099
2.6 电子对抗与电子反对抗 .....	101
2.7 电子反对抗技术推动电子战提升 .....	103
<b>第 3 章 雷达吸波材料和雷达截面积</b> .....	111
3.1 引言 .....	111
3.2 雷达吸波材料的分类 .....	112
3.3 ADS-B 系统简介 .....	115
3.4 雷达截面积 .....	122
3.5 减小雷达截面积 .....	127
3.6 跟踪低可探测飞机的方法 .....	132
3.7 破解隐身 .....	136
3.8 S-300V4 .....	143
3.9 S-400 .....	144
3.10 S-500 .....	145
3.11 美国对抗俄罗斯的隐身战斗机和轰炸机 .....	147
<b>第 4 章 隐身技术</b> .....	151
4.1 引言 .....	151
4.2 第五代战斗机(1995—2025 年) .....	154
4.3 计划中的第六代战斗机 .....	158
4.4 隐身技术发展史 .....	162
4.5 隐身技术 .....	164
4.6 更多关于隐身技术 .....	167
4.7 隐身技术的优势 .....	187
4.8 隐身技术的缺点 .....	189
4.9 量子隐身和隐身技术的未来 .....	193

4.10	隐身飞机的过去、现在和未来·····	196
4.11	隐身技术与电子战·····	197
4.12	电子炸弹驱动的定向能战争·····	203
4.13	第六代无人驾驶定向能武器的交付·····	209
4.14	突击战中的隐身行动·····	211
<b>附录 A</b>	<b>龙勃透镜雷达反射器·····</b>	<b>221</b>
<b>附录 B</b>	<b>高超音速推动未来战场新武器发展·····</b>	<b>232</b>
<b>附录 C</b>	<b>雷达数字信号处理·····</b>	<b>258</b>
<b>附录 D</b>	<b>单基地、双基地和多基地雷达·····</b>	<b>278</b>

# 第 1 章

## 雷达基础

本章介绍了雷达作为一种探测装置的基本原理。在不列颠之战的关键时期，雷达是帮助英国对抗德国空袭并取得胜利的重要因素。雷达是一种利用无线电波来确定目标距离、角度或速度的探测系统，可用来探测飞机、船舶、航天器和车辆，甚至能够预测天气和测量地形。此外，目前隐身技术的发展推动了战机向第六代升级，飞行速度高达 5~15 马赫的高超音速飞行器已成为新的威胁，因此，雷达电子战步入了一个全新的阶段。

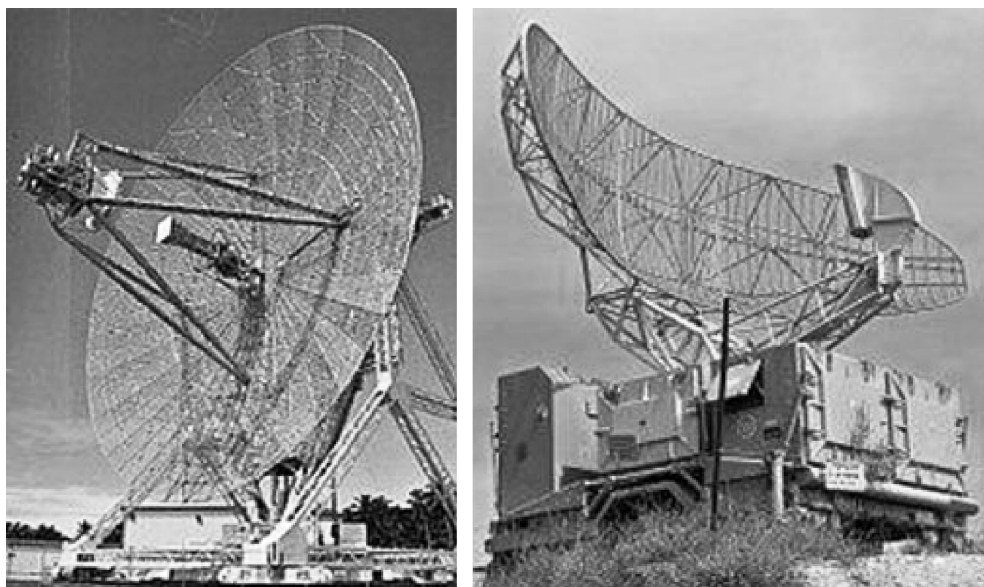
### 1.1 引言

雷达，又称 RADAR，是无线电探测和测距的首字母缩写。目前该技术已经普及，雷达的缩写形式已成为一个普通的名词。从雷达这个名称可以看出，该系统的工作原理是向远处发射横向电磁波。这里的横向电磁波是指电磁波的电场和磁场都垂直于传播方向平面的一种电磁波。在后续章节中，我们将分析横向和纵向电磁波的区别，以及它们如何探测具有不同威胁和特征的目标。

雷达系统由工作在无线电频段的发射机、发射天线和接收天线（通常发射与接收共用一个天线）、用来确定目标属性的接收机和处理机共同组成。其基本原理是发射机发出脉冲或连续的电磁波，电磁波被目标反射形成回波，回波被接收机所接收，进而从中提取出目标的位置和速度信息。

图 1.1(a)是用于跟踪空间物体和弹道导弹的预警雷达。图 1.1(b)是用于探测航空器的机械扫描雷达，它稳定旋转，以窄波束扫描空域。

雷达是第二次世界大战前和第二次世界大战期间由几个国家秘密研制的用于军事用途的装备。其中，由英国人发明的空腔磁控管使得雷达的体积得到了极大地缩减。雷达这个词是 1940 年由美国海军发明的，是无线电探测和测距的首字母缩写<sup>[1-2]</sup>。后来，“radar”这个词作为一个普通的名词进入英语和其他语言，也就不再有大写字母形式。



(a) 预警雷达

(b) 机械扫描雷达

图 1.1 典型的预警雷达和机械扫描雷达

现代雷达的用途非常多,包括:

- (1) 空中和地面交通管制以及雷达天文学;
- (2) 反导系统;
- (3) 用于定位地标和其他船舶的航海雷达以及飞机防撞系统;
- (4) 海洋监测系统;
- (5) 外层空间监视和对接系统;
- (6) 气象降水监测;
- (7) 测高和飞行控制系统以及制导导弹目标定位系统;
- (8) 用于地质观测的探地雷达。

高科技雷达系统与数字信号处理(DSP)和机器学习(ML)紧密联系,其中,机器学习集成人工智能(AI),结合深度学习(DL),能从高噪声中提取有用信息。雷达是自动驾驶系统中使用的一项关键技术,此外,自动驾驶系统中还使用了其他传感器<sup>[3]</sup>。

其他类似雷达的系统则利用了电磁波谱的其他频段。如激光探测和测距(激光雷达),它主要使用来自激光器的光线而不是无线电波,因此,有的参考文献称激光雷达为 LIDAR。随着无人驾驶汽车的出现,雷达有望帮助自动化平台监测其环境,从而防止不必要事故的发生<sup>[4]</sup>。

激光雷达的探测机制是利用激光照射目标,根据传感器测量反射光来确定目

标距离的测量方法。不同的激光返回时间和波长可以用来得到目标的三维参数。LIDAR 这个名称,现在是光探测和测距<sup>[5]</sup>(有时是光成像、探测和测距)的首字母缩写,最初是光和雷达的组合<sup>[6-7]</sup>。激光雷达有时被称为三坐标激光扫描仪,这是一种三坐标扫描和激光扫描的特殊组合。它有地面、机载和移动端应用。在图 1.2 中,美国空军的星火光学试验场将光辐射频率源(FASOR)运用到 LIDAR 和激光引导的星体实验中,将频率调谐到钠 D2a 光线上并用于激发大气上层的钠原子。

激光雷达通常使用紫外线(UV)或近红外线(IR)对物体成像。它可以应用于一些非金属物体中,包括岩石、雨、化合物、气溶胶、云,甚至单个分子<sup>[5]</sup>。一束狭窄的激光波束可以用极高的分辨率绘制目标的物理特征。例如,飞机能够以 30 cm 或更高的分辨率<sup>[8]</sup>来绘制地形。

机载激光雷达安装在飞机上,通过激光扫描创建一个三维景观的点云模型。这是目前最详细和准确的创建数字高程模型的方法,并且取代了摄影测量。与摄影测量相比,其最主要的优点是能够过滤点云模型中植被的反射,创建一个数字地形模型,该模型描述了隐藏在树木中的地表信息,如河流、道路、文化遗迹等。机载激光雷达在高空和低空的应用之间有区别,但主要的区别是在较高高度获得数据的精度和点密度都有所降低,详见图 1.3。

图 1.3 展示了机载激光雷达进行直线扫描的原理,这是较为常见的一种扫描方法。

使用激光雷达收集海拔数据最主要的优点包括具有较高的分辨率、厘米级精度和对森林地形的地面检测<sup>[8]</sup>。

激光雷达已经成为采集密集和精确高程数据的一种成熟方法。这种主动遥感技术与雷达类似,但使用的是激光脉冲而不是无线电波。激光雷达通常是“飞行”后从飞机上收集,它可以快速收集大面积的点(见图 1.3)。机载激光雷达也可用于浅水区域的水深模型的创建<sup>[9]</sup>。



图 1.2 典型的 FASOR 演示

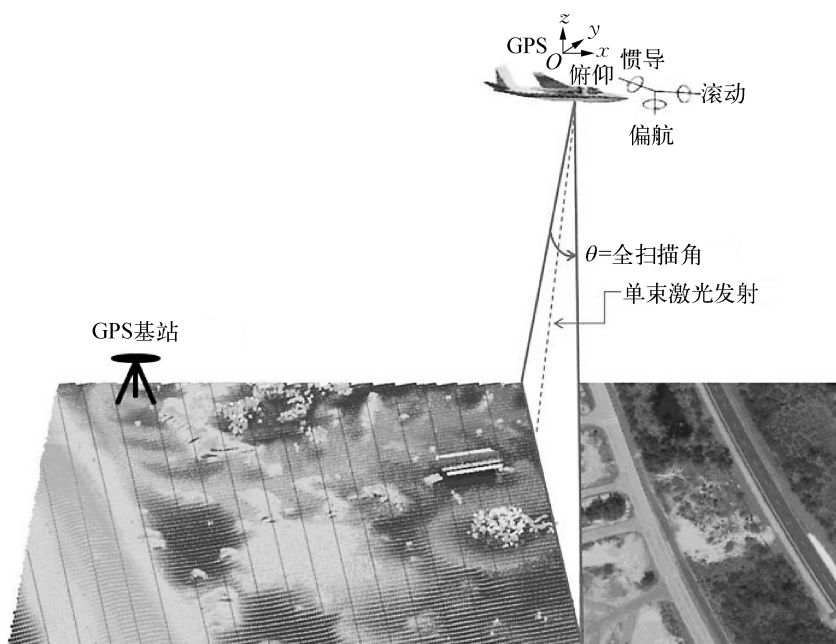


图 1.3 机载激光雷达直线扫描原理图(来源: www.wikipedia.com)

## 1.2 最早的雷达原理概念和实验

1886年,德国物理学家海因里希·赫兹(Heinrich Hertz)证明了固态物体可以反射无线电波。1895年,一名在克伦施塔特的俄罗斯帝国海军学校的物理老师有了进一步的发现,他发明了一种使用相干管来探测远距离雷击的仪器。第二年,在此基础上他添加了一个火花隙发射器。1897年,他在波罗的海为两艘船进行通信测试时,注意到第三艘船通过时产生的干扰,因此在报告中写道,这种现象可能用于探测物体,但他没有做进一步观察<sup>[9]</sup>。

德国发明家克里斯蒂安·胡斯迈耶(Christian Hulsmeyer)是第一个使用无线电波探测“远处金属物体存在”的人。1904年,他演示了探测浓雾中船只的可行性,但没有演示它与发射机的距离<sup>[10]</sup>。1904年4月,他的探测装置获得了专利<sup>[11]</sup>,后来他又为估算船距离的相关修正方法申请了专利<sup>[12]</sup>。1904年9月23日,他还获得了一项英国专利,名为全雷达系统,他称其为遥测机<sup>[13]</sup>。它的工作波长为50cm,脉冲雷达信号通过火花隙产生。该系统使用了带有抛物面反射器的经典喇叭天线装置,并在科隆和鹿特丹港的实际测试中提交给了德国军方官员,但最终未被军方采用<sup>[14]</sup>。

1915年,罗伯特·沃特森-瓦特(Robert Watson-Watt)利用无线电技术为飞行员提供预警<sup>[15]</sup>。20世纪20年代,英国研究机构在无线电技术方面取得许多进展,包括探测电离层和远距离闪电。通过闪电实验,沃特森-瓦特成为无线电测向的专家,之后他将研究转向短波传输。为了进行短波传输研究,他要求“新人”阿诺德·弗雷德里克·威尔金斯(Arnold Frederic Wilkins)对现有的短波设备进行广泛的调查。当飞机飞过头顶时,威尔金斯在手册中记录下了“衰减”效应(当时对干扰的普遍说法)。

1922年,美国海军研究人员 A. Hoyt Taylor 和 Leo C. Young 在横跨大西洋的波托马克河两岸分别安装了发射机和接收机后,发现船只通过波束路径会导致接收到的信号衰减。Taylor 提交了一份报告,认为这种现象可用于低能见度下对船只的探测,但海军没有立即继续这项工作。8年后,海军研究实验室(NRL)的 Lawrence A. Hyland 观察到经过的飞机也有类似的衰减效应,这一发现引发了对移动目标的无线电回波信号进一步深入研究,如图 1.4 所示。当然这是基于 Taylor 和 Young 的研究基础<sup>[16-17]</sup>。

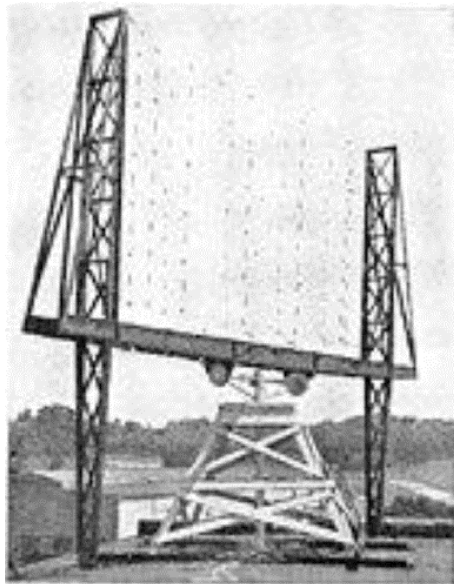


图 1.4 美国海军研究实验室实验天线配置  
(来源: www.wikipedia.com)

概括来说,雷达的发展历史可以延伸到现代电磁理论的时代,其中包括赫兹(Hertz)在 1886 年左右演示了无线电波的反射,并在 1900 年的采访中描述了电磁探测和速度测量的概念。1903 年和 1904 年,德国科学家胡斯迈耶(Hülsmeier)试验了通过无线电波反射进行船舶探测。1922 年,马可尼(Marconi)再次提出了这个想法。同一年,来自美国海军研究实验室的 Taylor 和 Young 演示了船只可被雷达发现的现象。1930 年,同样来自美国海军研究实验室的 Hyland 偶然发现雷达能探测飞机,开展了进一步研究,并于 1934 年申请了连续波(CW)雷达的美国专利。

在 20 世纪 30 年代左右,雷达有了进一步的发展,德国、俄罗斯、意大利和日本等国家都是其中的先驱。事实上,美国海军研究实验室的 R.M. Page 于 1943 年开始大力研制脉冲雷达之前,在 1936 年就有了一些成功演示实现的。同年,美国陆军通信兵开始实际的雷达相关工作,并在 1938 年首次运用 SCR-268 防空火控雷达系统(FCR)以及在 1939 年更新名称为 SCR-270 的早期预警系统(EWS),不幸的是 SCR-270 所发出的日本海军飞机袭击珍珠港的警告被悲惨地忽略了。



图 1.5 本土链监视雷达塔(英国埃塞克斯郡 Great Baddow)

同年,英国科学家罗伯特·沃特森-瓦特演示了脉冲雷达(PR),并在 1938 年建立了著名的本土链监视雷达网(见图 1.5),该雷达网在第二次世界大战期间,帮助英国成功阻击了德国的侵略步伐,并一直活跃到战后。

英国还在 1939 年发明了第一个空中截击雷达。在 1940 年前后美国和英国建立起了延续至今的合作,此时大多数雷达都是工作在高频(HF)和甚高频段(VHF),关于雷达频段的描述后文有介绍。英国公开了空腔磁控管这一关键的微波功率管技术,美国在麻省理工学院(MIT)建立了辐射实验室,这些都为微波频段雷达的成功开发奠定了基础,使系统能够在小尺度上实现,并能达到亚米分辨率,且一直占据技术主导地位<sup>[18-19]</sup>。

### 1.3 雷达的类型

正如本章引言所述,根据所给出的首字母缩写可知,雷达的原意是无线电探测和测距,并可将其分类如下:

- (1) 双基地雷达: 发射和接收天线位于不同位置(如地面发射机和机载接收机)。
- (2) 单基地雷达: 发射机和接收机并列,同样的天线用于发射和接收。如图 1.6 所示,其中  $R_r$  为接收距离, $R_t$  为发射距离,两者之间的夹角为  $\theta$ 。
- (3) 准单基地雷达: 发射天线和接收天线略有分离,但从目标上看似乎仍位于同一位置(例如,在同一架飞机上分别发射和接收)。

雷达功能分类如下:

- (1) 正常雷达功能: ① 距离(来自脉冲延时);② 速度(来自多普勒频移);③ 角度(来自天线指向)。
- (2) 特征分析和逆散射: ① 目标规模(由回波幅度计算);② 目标形状和组成(回波作为方向的函数);③ 活动部件(回波调制);④ 材料组成。
- (3) 雷达性能: 雷达的复杂性(成

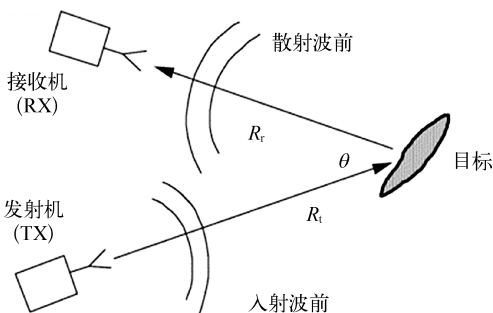


图 1.6 简易雷达的配置和功能