

电子与信息作战丛书

无源相参雷达系统 ——原理、信号处理及设计

吕晓德 仲利华 刘忠胜 张卓 关欣 著



科学出版社

电子与信息作战丛书

无源相参雷达系统——原理、 信号处理及设计

吕晓德 仲利华 刘忠胜 张 卓 关 欣 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对无源相参雷达,即基于“非定制”外辐射源信号进行相参处理的雷达系统,归纳总结其原理、信号处理进展及系统设计等方面的内容。全书共8章。第1章阐述无源相参雷达的基本定义及发展状况;第2章汇总信号处理方面的关联基础;第3章总结目前主要使用的外辐射源信号特点;第4章介绍信号处理中最重要的杂波对消和相参积累处理方法;第5章讨论参考信号对检测的影响及提纯处理方法;第6章介绍无源相参雷达经典测角及谱估计类处理进展;第7章针对该体制系统设计方面的特殊性,分析影响其威力、测试精度的要素、主辅天线及链路设计约束等特殊问题;第8章总结并提供一个继往开来的视角。

本书可供雷达系统设计、信号处理等领域的研发人员和研究生学习,以及具备信号与系统、雷达原理方面基础知识的相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

无源相参雷达系统:原理、信号处理及设计/吕晓德等著. —北京:科学出版社,2019.3

(电子与信息作战丛书)

ISBN 978-7-03-059486-0

I. ①无… II. ①吕… III. ①相参雷达-雷达系统-研究 IV. ①TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 256632 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年3月第 一 版 开本:720×1000 B5

2019年3月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:308 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“电子与信息作战丛书”编委会

顾 问:李 天 孙 聪 刘志敏 李燕东
魏金钟

主 编:张 澎

编 委:王永庆 陈 刚 薛 晖 傅盛杰
桑建华 戴全辉 苏士明 邓龙江
丁鹤雁 许小剑 周建江 高 铁
高 健

“电子与信息作战丛书”序

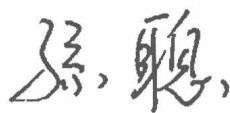
21 世纪是信息科学技术发生深刻变革的时代,电子与信息技术的迅猛发展和广泛应用,推动了武器装备的发展和作战方式的演变,促进了军事理论的创新和编制体制的变革,引发了新的军事革命。电子与信息作战最终将取代机械化作战,成为未来战争的基本形态。

火力、机动、信息是构成现代军队作战能力的核心要素,而信息能力已成为衡量作战能力高低的首要标志。信息能力,表现在信息的获取、处理、传输、利用和对抗等方面,通过信息优势的争夺和控制加以体现。信息优势,其实质是在获取敌方信息的同时阻止或迟滞敌方获取己方的情报,处于一种动态对抗的过程中,已成为争夺制空权、制海权、陆地控制权的前提,直接影响整个战争的进程和结局。信息优势的建立需要大量地运用具有电子与信息技术、新能源技术、新材料技术、航空航天技术、海洋技术等当代高新技术的新一代武器装备。

如何进一步推动我国电子与信息作战的研究与发展?如何将电子与信息技术发展的新理论、新方法与新成果转化为新一代武器装备发展的新动力?如何抓住军事变革深刻发展变化的机遇,提升我国自主创新和可持续发展的能力?这些问题的解答都离不开我国国防科技工作者和工程技术人员的上下求索和艰辛付出。

“电子与信息作战丛书”是由设立于沈阳飞机设计研究所的隐身技术航空科技重点实验室与科学出版社在广泛征求专家意见的基础上,经过长期考察、反复论证之后组织出版的。这套丛书旨在传播和推广未来电子与信息作战技术重点发展领域,介绍国内外优秀的科研成果、学术著作,涉及信息感知与处理、先进探测技术、电子战与频谱战、目标特征减缩、RCS 测试与评估等多个方面。丛书力争起点高、内容新、导向性强,具有一定的原创性。

希望这套丛书的出版,能为我国国防科学技术的发展、创新和突破带来一些启迪和帮助。同时,欢迎广大读者提出好的建议,以促进和完善丛书的出版工作。



中国工程院院士

前 言

无源雷达是雷达最早的工作形态之一,重新获得广泛关注则是近 20 年的事情。究其原因,一方面是在复杂电磁环境下,人们对雷达对抗性能提出更高要求,其体制特点具备先天的对抗优势;另一方面,各类外辐射源,包括广播、电视、导航、通信等迅猛发展,可用的辐射信号日益丰富,为该体制雷达的发展创造了良好的客观条件。此外,雷达信号处理、数字电路、计算机技术的飞速发展也为该体制的实用化奠定了技术基础,使无源雷达成为目前雷达领域的重要研究分支和关注热点。

本书以无源相参雷达系统为对象,总结其相关基础及研制进展。参与者均从事雷达系统、阵列信号处理及雷达试验等相关领域的研究,所在的微波成像技术国家重点实验室长期从事雷达成像、目标探测领域的研究,在雷达系统设计、信号处理、图像分析、目标特性及目标检测等领域有扎实的研究基础和技术积累,希望能为同侪提供一本系统、实用的参考资料。

从内容来看,全书可分三个部分,第一部分是基础,主要阐述无源相参雷达的基本定义及发展状况、信号处理关联基础及外辐射源的信号特点;第二部分是信号处理,包括杂波对消、相参积累、参考信号质量对探测性能的影响及提纯处理,以及无源相参雷达测角的经典方法和最新进展等;第三部分是系统设计及总结,侧重无源相参雷达系统设计的特殊性,包括影响其威力、测试精度的要素,主辅天线及链路设计约束等特殊问题。作为几个探讨要点,本书系统归纳梳理无源相参雷达的技术特征;目前可用的外辐射源五花八门,我们从雷达探测角度逐个归纳其技术特点及应用状态,可以作为辐射源的汇总;信号处理部分,包括基本的对消及积累,以及专项的参考信号处理等,务求落脚到可操作层面,体现接地气的一面;系统设计部分虽有很多经典参考资料,但在所有章节耗时最巨,因为不想重复太多。另有一些工程研制的“干货”,供感兴趣的同道“品鉴”。

多位研究人员和研究生参与了书稿的编写工作,包括已经从本实验室毕业的赵耀东、金威、蒋柏峰、李纪传、杨鹏程博士和赵永科、刘宇、柴致海、张丹硕士等,在读的杨璟茂、岳琦、张汉良等研究生,没有你们的贡献,就没有本书的出版,在此深表谢意!全书由吕晓德统一定稿。

作者的研究工作及本书的出版得到了多方面的牵引、指导和帮助,感谢中国科学院电子学研究所吴一戎、丁赤飏、洪文等领导,一室的梁兴东、陈龙永、李道京研究员与八室的雷斌、胡玉新、胡文龙、胡东辉等专家在项目实施中给予的有力支持。特别感谢多位高校、研究所的资深人士给予的专业、不计利益的帮助,包括北京理

工大学的单涛老师、西安电子科技大学的王俊老师等,在此一并致谢!

限于作者水平,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

吕晓德

目 录

“电子与信息作战丛书”序

前言

第 1 章 无源相参雷达概述	1
1.1 引言	1
1.2 系统基本定义	2
1.2.1 一个例子	2
1.2.2 有源/无源雷达	3
1.2.3 非相参、相参雷达	7
1.2.4 本书定位	7
1.3 系统组成、原理及关键技术	8
1.3.1 无源相参雷达组成	8
1.3.2 工作原理及流程	9
1.3.3 关键技术	10
1.4 发展现状	13
1.4.1 军事应用系统	14
1.4.2 科研应用系统	19
1.4.3 国内研发概述	22
1.5 无源相参雷达应用特点	22
1.5.1 隐蔽性	23
1.5.2 反隐身性	24
1.5.3 部署成本低	24
1.6 本书内容组织	24
参考文献	25
第 2 章 信号处理基础	27
2.1 引言	27
2.2 随机信号	27
2.2.1 随机过程数字特征	28
2.2.2 平稳性和遍历性	28
2.2.3 高斯白噪声	29
2.3 相关接收	31

2.3.1	相关函数	31
2.3.2	匹配滤波器	32
2.4	模糊函数	33
2.4.1	匹配滤波器组	33
2.4.2	模糊函数定义	34
2.4.3	模糊函数性质	34
2.5	统计估计基础	34
2.5.1	估计量	35
2.5.2	估计量的性质	35
2.5.3	克拉默-拉奥界	36
2.6	最优滤波理论	36
2.6.1	维纳滤波器	36
2.6.2	卡尔曼滤波器	38
2.7	自适应滤波理论	39
2.7.1	LMS 自适应滤波器	39
2.7.2	RLS 自适应滤波器	41
2.7.3	格型线性预测器	42
2.8	本章小结	45
2.9	思考及练习	45
	参考文献	45
第3章	外辐射源特性分析	47
3.1	引言	47
3.2	中国地面数字电视广播	47
3.2.1	信号标准概述	47
3.2.2	信号技术要点	48
3.2.3	模糊函数分析	49
3.2.4	应用于雷达的研究、试验情况	51
3.3	DVB-T 信号	51
3.3.1	信号标准概述	51
3.3.2	信号技术要点	51
3.3.3	模糊函数分析	52
3.3.4	应用于雷达的研究、试验情况	52
3.4	DVB-S 信号	53
3.4.1	信号标准概述	53
3.4.2	信号技术要点	53

3.4.3 模糊函数分析	54
3.4.4 应用于雷达的研究、试验情况	56
3.5 FM 信号	57
3.5.1 信号标准概述	57
3.5.2 信号技术要点	57
3.5.3 模糊函数分析	57
3.5.4 应用于雷达的研究、试验情况	58
3.6 GPS 信号	59
3.6.1 信号标准概述	59
3.6.2 信号技术要点	59
3.6.3 模糊函数分析	59
3.6.4 应用于雷达的研究、试验情况	60
3.7 GSM 信号	60
3.7.1 信号标准概述	60
3.7.2 信号技术要点	60
3.7.3 模糊函数分析	63
3.7.4 应用于雷达的研究、试验情况	63
3.8 模拟电视信号	64
3.8.1 信号标准概述	64
3.8.2 信号技术要点	64
3.8.3 模糊函数分析	67
3.8.4 应用于雷达的研究、试验情况	69
3.9 本章小结	69
3.10 思考及练习	70
参考文献	70
第4章 对消及相干处理	74
4.1 引言	74
4.2 自适应杂波对消	76
4.2.1 基本模型及评价	76
4.2.2 LMS 类自适应对消方法	78
4.2.3 分数延迟采样分析及处理	81
4.2.4 基于矢量步长的归一化最小均方误差算法	87
4.2.5 快速实现方法	91
4.3 相干积累	97
4.3.1 互模计算及应用问题	97

4.3.2	模糊函数的快速算法	98
4.3.3	基于分段的多普勒谱分析等效	101
4.3.4	长时间积累时的目标徙动	106
4.3.5	距离走动和多普勒徙动校正	109
4.4	目标检测方法及其误差	113
4.4.1	CFAR 检测	113
4.4.2	参数测量及误差分析	114
4.5	其他特殊问题	115
4.5.1	海杂波抑制	115
4.5.2	强干扰抑制	116
4.6	本章小结	117
4.7	思考及练习	118
	参考文献	118
第5章	参考信号影响分析及处理技术	123
5.1	引言	123
5.2	参考信号质量的影响分析	124
5.2.1	信号模型	124
5.2.2	SNR 影响分析	126
5.2.3	SCR 影响分析	127
5.2.4	目标回波影响分析	128
5.3	参考信号空域处理	129
5.4	参考信号时频处理技术	131
5.4.1	LMS 提纯算法	131
5.4.2	恒模均衡	134
5.4.3	复倒谱方法	134
5.5	参考信号重构技术	135
5.5.1	重构的定义及应用依据	135
5.5.2	重构流程	136
5.5.3	信号域重构	137
5.5.4	符号域重构	142
5.5.5	比特域重构	145
5.6	本章小结	153
5.7	思考及练习	153
	参考文献	154

第 6 章 目标波达方向估计	158
6.1 引言	158
6.2 无源相参雷达目标角度估计基础	159
6.2.1 无源相参雷达角度估计在信号处理流程中的衔接关系	161
6.2.2 杂波对消及相干积累对空间相位差的影响分析	162
6.3 经典比幅、比相测角在无源相参雷达中的应用	165
6.3.1 利用幅度信息的测角方法	165
6.3.2 利用相位信息的测角方法	167
6.3.3 比幅、比相方法性能分析	169
6.3.4 经典测角法仿真及实测数据分析	172
6.4 空间谱估计技术在无源相参雷达中的应用	174
6.4.1 经典 MUSIC 算法	174
6.4.2 无源相参雷达中空间谱估计应用问题	175
6.4.3 相关数据域伪协方差矩阵构造方法	177
6.4.4 直接数据域伪协方差矩阵构造方法	178
6.4.5 基于奇异值分解的伪协方差矩阵构造方法	180
6.4.6 基于压缩感知的单快拍多目标角度估计方法	183
6.5 多径效应下无源相参雷达仰角估计	183
6.5.1 多径对无源相参雷达目标仰角估计的影响	184
6.5.2 基于波瓣分裂的仰角估计方法	186
6.5.3 广义 MUSIC 类仰角估计方法	187
6.6 本章小结	191
6.7 思考及练习	191
参考文献	191
第 7 章 无源相参雷达系统设计	194
7.1 引言	194
7.2 系统设计基础	195
7.2.1 有源雷达方程回顾	195
7.2.2 无源雷达方程	196
7.2.3 无源雷达探测覆盖特点	198
7.2.4 时延精度分析	201
7.2.5 测角精度分析	202
7.2.6 单基距离误差	203
7.2.7 测速指标	204
7.3 信号处理损失分析	205

7.3.1	对消处理损失分析	206
7.3.2	积累损失分析	210
7.4	主辅天线设计约束	212
7.4.1	主辅天线增益、副瓣影响及设计	212
7.4.2	参考通道杂波强度分析	213
7.5	通道一致性及杂散设计约束	215
7.5.1	通道一致性分析	215
7.5.2	杂散控制要求	219
7.6	设计例子	219
7.6.1	设计参数	219
7.6.2	设计参数说明	220
7.6.3	威力分析	221
7.7	本章小结	222
7.8	思考及练习	222
	参考文献	223
第8章	无源相参雷达发展展望	224
8.1	技术发展趋势	224
8.1.1	长时间相参积累处理技术	224
8.1.2	数据处理技术	226
8.1.3	新型辐射源及多源综合利用技术	227
8.1.4	基于运动平台的无源雷达系统	227
8.1.5	绿色化	228
8.2	应用展望	228
8.2.1	机载、艇载侦察预警系统	229
8.2.2	重点区域综合探测网	229
8.2.3	低空开放	230

第 1 章 无源相参雷达概述

利用目标对电磁波的散射信号实现目标探测是雷达的基本特征,那么完全的“无源”对雷达就是个伪命题;雷达与电子侦察领域都有各自的习惯术语,难免混淆;单就雷达领域,对基于外辐射源的雷达也有诸多名称,统一的理解是需要的。本章将梳理该类系统的特点,并总结其关键技术、发展现状及应用特点。

1.1 引言

经过近一个世纪的发展,雷达已经成为技术体系及应用领域最为庞杂的传感器之一。严格来说,目前雷达的功能范畴已超越了当初命名时单纯的“探测”和“测距”,不变的都是利用电磁波照射目标后形成二次散射信号。这是雷达区别于通信、导航、电子侦察等系统的根本特征。

根据不同的技术特征,可以得到不同的雷达分类结果:一般按功能、体制、频段、工作平台及提供的目标参数种类等进行分类,很多雷达著述中^[1]均有涉及,此处不再赘述。

雷达方程是描述其工作性能的共性模型,一般为

$$(R_T R_R)_{\max} = \left[\frac{P_{av} G_T G_R \lambda^2 \sigma_B F_T^2 F_R^2 g_{\#}}{(4\pi)^3 K T_a B_n F_n (S/N)_{\min} L_T L_R} \right]^{1/2} \quad (1.1)$$

其中, R_T 和 R_R 分别是发射机和接收机至目标的距离(m);

P_{av} 为发射平均功率(W);

G_T 和 G_R 为发射天线增益和接收天线增益,当收发共用天线,如单基雷达,两者相等,但双基乃至多基系统,两者往往相互独立;

λ 为波长(m);

σ_B 为目标雷达截面积(radar cross section, RCS)(m^2);

F_T 和 F_R 分别是发射和接收的方向图传播因子;

$g_{\#}$ 为积累增益,主要取决于系统所用信号的调制方式、时带积等;

K 为玻尔兹曼常量等于 1.38×10^{-23} J/K;

T_a 为噪声温度,标准温度等于 290K;

B_n 为接收机有效带宽(Hz);

F_n 为接收机等效噪声系数;

$(S/N)_{\min}$ 为检测因子,取决于检测概率和虚警概率;

L_T 和 L_R 分别是发射和接收链路的损耗,每一项又可以细分为多种类的多个子项。不同体制系统之间差别很大,例如发射损耗,集中式发射往往比分布式发射损耗大几个分贝。处理损耗则可能因系统体制造成更大的差别,这将在后续系统设计中详细讨论。

雷达的两个重要分类标准与本书内容紧密相关。

① 按系统自身是否调制、发射照射目标的信号,分为协作式和非协作式两类。前者根据收、发天线是否分置又可细分为单基雷达和双/多基雷达,后者则利用已有的外部辐射源工作,故称无源雷达。

② 按能否对接收信号进行同相匹配处理,分为非相参雷达和相参雷达。当然,这更多地是一种分类讨论上的意义,对于现代雷达,相参处理已经成为一种基本特征。

本书的讨论对象就是无源相参雷达,在雷达共性理论、方法、技术的基础上,重点总结、探讨该体制在信号处理、系统设计方面的特殊性。

随着技术发展,该体制雷达融合了多项雷达领域的先进技术,包括多通道阵列数字波束合成(digital beam forming, DBF)技术、相控阵技术、强杂波抑制技术、极弱目标检测技术、并行处理技术及复杂数据处理技术等,是目前研究的热点和难点之一。从应用角度看,由于该类体制在侦察、对抗方面的特殊优势,已成为目前各军事强国雷达领域的重点发展方向。其绿色、低廉的特点也使其在民用领域具备很大潜力,且随着今后环境中电磁信号的增加而提供新的增长动力。

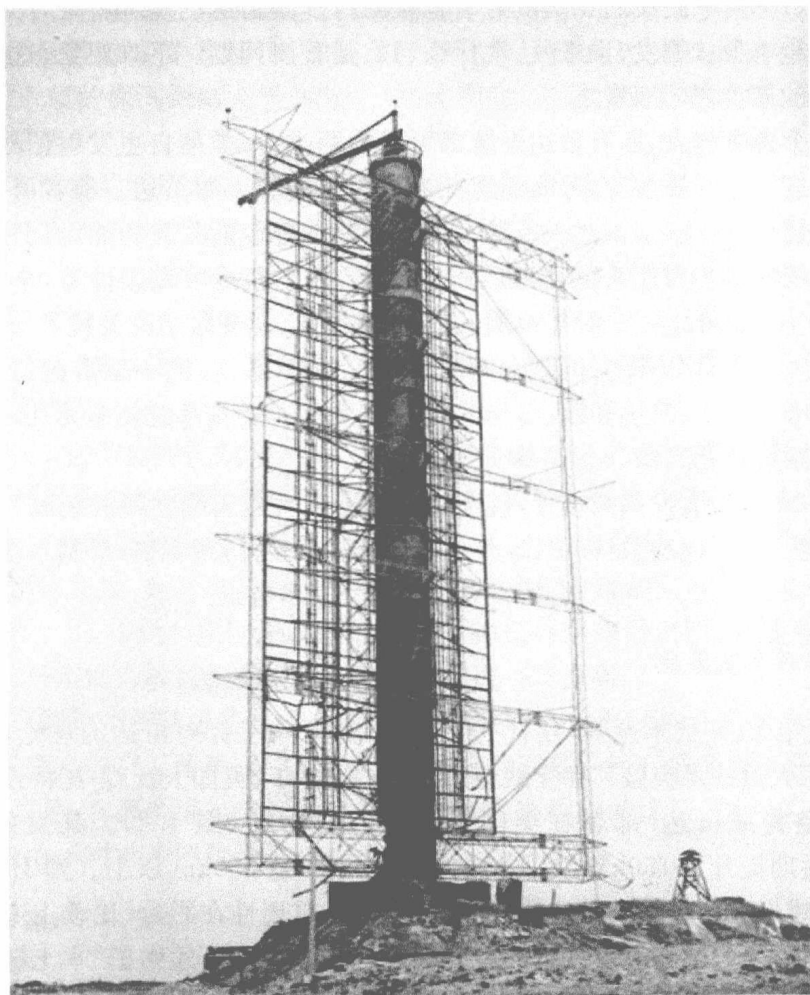
本章首先讨论无源相参雷达的定义,然后探讨其系统组成、工作原理、目前发展现状及应用特点,最后一章从技术发展规律及应用需求探讨其发展趋势。

1.2 系统基本定义

1.2.1 一个例子

1943 年底,欧洲战事正酣。德国军方陆续在英吉利海峡大陆一侧,包括法国、比利时、荷兰等部署了 7 套 Klein Heidelberg (KH) 防空雷达(分别在 Limmen、Oostvoorne、Ostend、Boulogne、Abbeville、Cap d'Antifer 和 Cherbourg)^[2],其主要功能是,当盟军轰炸机飞越英吉利海峡发动进攻时,系统发出警报。特殊的是,这套雷达严格而言只有接收机及其控制、支撑设备,其接收的信号是英国“本土链”(chain home, CH)雷达发射机发射信号照射目标后的散射信号,这应该是基于非协作信号无源雷达的首次实战部署(图 1.1)。

KH 系统基于“本土链”雷达发射的 22~28MHz 的雷达信号,对目标作用距离

图 1.1 KH 雷达系统^[2]

可达到 300km,甚至 400km。尽管系统部署时间晚,并未在后续的欧洲战场发挥作用,但在技术方面却具有里程碑意义:在已有的有源、双/多基雷达系统基础上,基于非协作发射信号实现目标探测。毋庸置疑,这是雷达领域一次重要的观念创新。

1.2.2 有源/无源雷达

在雷达、电子侦察等领域,经常根据系统、部件是否包括发射设备区分为有源、无源,主动、被动等。在此要澄清的一个术语是:有源与主动只是不同领域对相同性质物理对象的习惯性称谓(active);无源与被动也是如此(passive)。本书后续章节均采用有源、无源这一雷达领域习惯性称谓体系。

基于目标对电磁波的二次散射信号探测目标是雷达的基本特征,那么所用的电磁波信号本身从哪发、谁来发、发什么当然是首要问题。不难想象,这也是决定雷达性能的最重要的因素之一。

从这个角度出发,所有雷达系统都可分为两类,一类是自主发射信号,另一类是利用已有的外部辐射源,可简明定义为有源雷达和无源雷达。前者可进一步细分为单基雷达、双/多基雷达。单基系统指系统本身包括收发功能,典型应用如共用收发天线的单基雷达系统,其信号发射设备(发射机或收发组件等)是系统基本且体量最大的组件之一。对于早期的双/多基系统,尽管限于开关技术等因素使得收发天线物理上是分开的,但收发天线之间的距离(基线)远小于雷达到目标的距离。在这种情况下,系统性能、目标 RCS 响应等仍与单基系统相差无几,因此仍定义为单基系统。

与此对应,若收发基线接近,甚至超过目标到雷达天线之间的距离,此时系统的设计方法、分析模型、目标 RCS 等与单基有明显差异;或者说,单基系统是双/多基系统的一个特例。下面结合典型系统探讨其技术特点。

1. 有源单基系统

20 世纪 20 年代末至 30 年代初,许多国家开展了针对雷达的理论和试验研究,获得了大量技术突破。在实战应用方面,1936 年,英国人沃森-瓦特设计的“本土链”对空警戒雷达,部署在英国泰晤士河口附近(图 1.2)。其发射功率为 350kW,后期提升为 750kW,对飞机的探测距离可达 250km 以上。到 1941 年,沿英国海岸线部署了完整的雷达警戒网,该系统的重要性在影片《伦敦上空的鹰》中有生动展示,成为影响战争胜负的重要因素之一。很多著述中把“本土链”雷达作为双/多基雷达的代表,但由于其收发基线远小于探测距离,更接近有源单基系统。

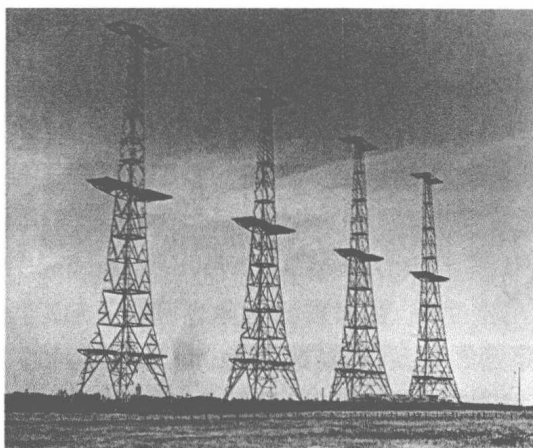


图 1.2 “本土链”雷达