



装备科技译著出版基金资助

高新科技译丛

Detecting and Classifying  
Low Probability of Intercept Radar  
Second Edition

# 低截获概率雷达 的检测与分类 (第2版)

【美】 Phillip E. Pace 著 陈祝明 江朝抒 段锐 译



本书附光盘一张



ARTECH HOUSE  
BOSTON | LONDON



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

装备科技译著出版基金资助  
高新科技译丛

# 低截获概率雷达的 检测与分类

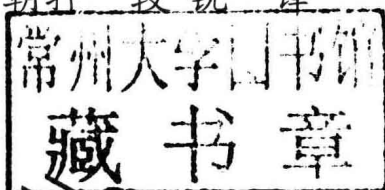
(第2版)

Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar

(Second Edition)

[美] Phillip E. Pace 著

陈祝明 江朝抒 段锐 译



**ARTECH  
HOUSE**

BOSTON | LONDON  
artechhouse.com

国防工业出版社

• 北京 •

著作权合同登记 图字:军-2011-090 号

图书在版编目(CIP)数据

低截获概率雷达的检测与分类: 第2版/(美)佩斯  
(Pace, P. E.)著;陈祝明,江朝抒,段锐译. —北京:  
国防工业出版社, 2012. 8  
(高新科技译丛)  
书名原文: Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar  
ISBN 978-7-118-08050-6

I. ①低… II. ①佩… ②陈… ③江… ④段… III.  
①低截获概率雷达—检测②低截获概率雷达—分类 IV. ①TN951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 113826 号

Translation from the English language edition:  
Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar (Second Edition) by Phillip E. Pace  
©2009 ARTECH HOUSE  
685Canton Street  
Norwood, MA 02062  
All rights reserved.  
本书简体中文版由 Artech House, Inc. 授权国防工业出版社独家出版发行。  
版权所有,侵权必究。  
低截获概率雷达的检测与分类(第2版)  
Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar(Second Edition)

低截获概率雷达的检测与分类(第2版) [美]菲利普·E·佩斯 著  
陈祝明 江朝抒 段锐 译

出版发行 国防工业出版社  
地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048  
经 售 新华书店  
印 刷 北京奥鑫印刷厂  
开 本 787×1092 1/16  
印 张 32<sup>3</sup>/<sub>4</sub>  
字 数 738 千  
印 版 次 2012 年 8 月第 2 版第 1 次印刷  
印 数 1—3000 册  
定 价 152.00 元(含光盘)

(本书如有印装错误,我社负责调换)  
国防书店:(010)88540777 发行邮购:(010)88540776  
发行传真:(010)88540755 发行业务:(010)88540717

## 译者序

雷达自第二次世界大战投入使用以来,因其在军事作战中体现出的显著效果而在军事领域得到了广泛的应用和长足的发展,相继出现了以脉冲多普勒、相控阵和合成孔径等为标志的现代雷达系统。然而,雷达对抗自雷达使用以来就已出现,并如影随形般不断发展,从简单的无源干扰、强功率的压制式干扰到智能化的欺骗式干扰。然而,不论哪一种干扰措施,其作用的前提是要感知到雷达的存在及其所处的几何位置,即依赖于对雷达发射信号的截获能力。总之,雷达期望能够在各种复杂的电磁环境下发现目标,同时又期望自己的发射信号尽可能不被敌方所发现,这两种需求在技术方案上是相互矛盾的,雷达设计师往往会顾此失彼。为此,如何根据雷达的战术需求,通过雷达信号和系统的优化设计,使得雷达的探测性能和对抗性能达到某种合理的平衡,这一理念正是《低截获概率雷达的检测与分类》的开篇第1章——“发现与不被发现”所体现的。

《低截获概率雷达的检测与分类》分为两个部分,第一部分为“低截获概率雷达设计基础”,主要讲述了低截获概率雷达设计的基本概念、常用的低截获信号及其性能以及低截获雷达在武器装备中的应用示例;第二部分为“截获接收机策略及其信号处理”,讲述了截获接收机对抗低截获信号的策略、相应的信号处理算法原理、对常用低截获信号的检测与分类性能及其在反辐射导弹中的应用示例。

《低截获概率雷达的检测与分类》的作者 Phillip E. Pace 是美国海军研究生院(NPS)电气与计算机工程系的教授,负责联合服务电子战 NPS 中心,自1998年10月起一直担任海军威胁导弹仿真验证工作组的主席,于1999年1月参加了海军 NULKA 专家小组。他长期从事接收机设计、信号处理、电子战和武器系统分析等领域的研究工作,发明了“对称数字系统”的概念,并另著有教材《数字接收机先进技术》(Artech 出版社,2000年)。

《低截获概率雷达的检测与分类》是 Phillip E. Pace 教授为电子工程、物理和系统工程专业高年级本科生和研究生入门阶段编写的教材,尤其适合于从事实际工程的学生。该书于2003年出了第1版,很快在该领域读者中获得了良好的反响,因此 Phillip E. Pace 教授根据读者反馈的意见和该领域发展的最新成果,在第1版的基础上对内容进行了调整和补充,于2009年

出了第2版。

我们在教学和科研中发现,现有的雷达或雷达对抗类书籍要么侧重于雷达,要么侧重于雷达对抗,从矛和盾的两个方面进行综合分析的很少,将理论知识与武器装备应用结合起来的几乎没有,而《低截获概率雷达的检测与分类》正好弥补了这一缺憾。此外,本书还配备了光盘,其中的MATLAB程序涵盖了书中所有的雷达信号设计、截获信号处理及其性能评估的算法,特别有助于加深对本书内容的理解和对书中知识的灵活应用。本书既适合于在校从事雷达及雷达对抗学习与研究的大学生和研究生,也适合于从事雷达及雷达对抗设备研究、制造和使用的工程技术人员。

在翻译过程中,我们尽量忠实于原著,但对原著中明显的错误直接进行了修正。本书的第1章至第7章由陈祝明翻译,第12章至第18章由江朝抒翻译,第8章至第11章和附录由段锐翻译。全书的统稿工作由陈祝明完成。本书的出版得到了总装备部译著基金、总装备部预研基金、电子科技大学“十二五”规划研究生教材建设项目和电子科技大学电子工程学院的资助,在此表示诚挚的谢意。还要感谢中国电子科技集团第29所张锡祥院士、南京理工大学谢仁宏教授、国防工业出版社张冬晔编辑在总装备部译著基金的申请和本书的出版过程中给予的很多指导和帮助。对研究生黄美秀、苏励、范春波、何奎、李娟、邓填隼、夏雪、徐福元、曾海涛、吴玉孟、蔡成兵、袁海峰、王玲、张龙峰、王睿杰、黄灿、张容和余波等在翻译过程中所做的有益工作,在此也表示感谢。由于本书内容涉及面较广,加之作者水平和时间限制,疏漏甚至错误之处在所难免,请读者给予谅解和指正。

陈祝明 江朝抒 段锐

2011年12月于成都·电子科技大学

# 原 序

在《低截获概率雷达的检测与分类》第1版的序中,我注意到了雷达中“发现与不被发现”的价值很大,将其统称为低截获概率雷达或LPI雷达。总之,近年来这一价值进一步凸显,该领域的新书来得既及时又受欢迎。对于远程雷达,其LPI雷达设计的问题是难以解决的,因为截获方得到的信号是按发射机至截获接收机的距离的平方减少的,而雷达方得到的信号是按雷达至目标的距离的四次方衰减的。Phillip E. Pace从早期工作开始就涉足了LPI雷达的各个方面,近来在相关领域都有其独到的见解。他在该书中增加了许多全新的内容,其主题包括噪声雷达、网络中心战和雷达组网。他还考虑了截获问题,增加了有关Choi-Williams分布应用方面的材料,以及有关自动提取和识别的体系结构方面的章节。在一本书覆盖了雷达和截获问题,为该重要的技术领域提供了颇具价值的参考工作。

在过去的半个多世纪,雷达截获技术不断演化,通常截获接收机得到高的信号强度,使得截获接收机可以采用门限检测来检测每部雷达的脉冲,然后去估计其参数,如载波频率、到达角、脉冲宽度、到达时间、极化以及其它的单个脉冲参数。这些参数构成了脉冲描述字,再经分选、去交织和分析,以识别PRI的样式。这种信号截获和威胁识别的方法需要对各个脉冲进行高概率的检测。反辐射导弹和其它对敌防空压制手段使得峰值功率的减少关系到雷达的生死存亡。这迫使信号截获重新审视其单脉冲检测方法,反过来又迫使作战雷达功能重新掂量其高峰值发射功率的使用。

不论你是对LPI雷达设计所用的技术感兴趣,还是对LPI雷达设计对抗有用的技术感兴趣,这本书都可以为重新思考雷达问题和截获问题提供一个良好的切入点。

Richard G. Wiley 博士

雪城研究协会公司副总裁、首席科学家

2008年12月于纽约雪城

# 前言

## 简介

《低截获概率雷达的检测与分类》(第2版)旨在满足电子工程、物理和系统工程专业高年级本科生和研究生入门阶段的需求,尤其是那些从事实际工程的学生。正如一些学生所说,低截获概率(LPI)雷达必须包含事物的两个方面。虽然雷达本身也有些吸引力,但似乎很少针对这些学生中的大多数,随着对抗 LPI 的数字截获接收机和信号处理技术的发展,这门课程对他们变得更有意义。我作为学生、工程师和教师的经历使得我产生这样一种想法:对于这个研究领域的成功的教材而言,它既应该包括雷达的设计特性,也应该包括非合作的检测策略和算法。为此,这门课程既涉及截获接收机的结构,也涉及 LPI 波形调制的设计,为研究其各种折中提供了一个有益的尝试。

本书源于海军研究生院网络中心雷达电子战、信号处理和宽带数字接收机技术领域的研究和教学。本书的第1版是基于在 IEEE 航空电子杂志上发表的综述文章以及业界和大学中诸多学生的反馈。这一版尽管只出版了四年,但新版本显然应该纳入那些建设性的主题,并对内容进行调整。

LPI 雷达系统正得以空前的发展。在许多国家的各种应用中,发射机的高效应用已获得里程碑式的成果。另一方面,近年来 LPI 雷达的进展也推动了超灵敏截获接收机的设计和高速信号处理的发展,以用于对 LPI 主动发射机的检测、分类以及 LPI 的对抗。

## 新内容

第2版中新增的 LPI 雷达技术包括:随机噪声雷达波形及其周期模糊函数特性、不同类型的相关接收机(第7章),天波和地波超视距雷达系统及其从传统波形到新 LPI 调制的转变(第8章),网络化的 LPI 雷达传感器以及正交多相调制、网络中心战原理、频率跳变波形以及信息网络分析(第10章)。

第2版中补充的新的截获接收机策略和信号处理算法包括:LPI 波形的 Chio-Williams 时频分析(第13章)、基于检测 LPI 发射机的反辐射导弹及其新型导引头设计(第16章)、用于识别截获调制的特征自动提取和分类算法(第17章)、调制参数自动提取的信号处理(第18章)。

本书一个不同的特点在于所探讨的 LPI 技术超出了单个发射机的范畴,采用网络来集成多个分布式的传感器以提供目标的额外形态。利用传感器网络能够在很多重要的应用中展现出新的能力。其次,本书验证了所提供的能够自主运行的检测与分类算法,不取决于某种程度的人为解释。这些调制的自动判决结果所涉及的技术为截获接收机提供了

对抗 LPI 所需的快速反应的实时响应能力。

## 课程安排

本书不仅可以作为教材,也可以作为雷达和数字截获接收机设计工程师工作的参考书。本书的布局适用于许多不同的课程安排,包括一个学期(两个半学期)的课程安排,学习内容包含低截获概率雷达系统设计(第一部分)及其相应发射机的非合作检测与分类(第二部分)。本书尤其适合于两到四天的短期培训课程。本书的前提是学生至少具有工程和数字方面的高年级学习经历,具备编写和运行计算机程序的能力。雷达课程和信号处理课程可以为本书提供有用的知识背景。

## 本书概述

本书在第 1 版中分为两个部分,第一部分的主要目的是统一对 LPI 雷达基本设计原理的表述。这包括对很多种宽带调制信号的充分探讨,这类信号可以降低非合作截获接收机提取其波形参数的概率(波形参数的提取容易导致电子干扰机的有效响应)。第二部分的主要目的是介绍截获接收机提取宽带波形参数的时频和双频信号处理技术。自动分类和参数提取算法的目的是发展电子干扰机的实时响应技术,这正是其不放在第一部分介绍的原因。总之,是在 LPI 雷达及其波形设计概念(第一部分)与用于对抗 LPI 雷达的 LPI 波形检测和描述的信号处理技术(第二部分)之间寻求一种平衡。

每章后面的练习是使用本教材的课程不可或缺的部分。本书的一大特色是 MATLAB 的大量使用,随书附带的光盘包含了许多程序,既可以用于练习习题以深化对概念的理解,也可以用于产生读者感兴趣的一些新的和有用的结果。这些练习常常有助于完善读者对概念的理解或介绍书中概念的不同应用。

本书包含了足够的数学细节以使一般的电子工程和物理专业的大学生不难于跟进其分析和设计,分析细致、严密和充分到了一定程度,以使得许多专题可以借助于诸多参考文献进行进一步的研究。各章的简述如下:

### 第一部分 低截获概率雷达设计基础

第 1 章介绍了 LPI 雷达以及 LPI 需求的缘由,包括了先进的截获接收机和反辐射导弹的威胁;介绍了 LPI 雷达有别于常规雷达的特性并强调了连续波(CW)雷达的 LPI 雷达结构;分析了 LPI 雷达的探测距离,并采用截获距离和处理增益对 LPI 雷达的优点进行了定量描述;为了说明其分析过程,借用 Pilot LPI 雷达介绍了多个示例。

第 2 章回顾了 LPI 雷达技术最新的和综合的应用,包括雷达高度表、监视、导航和用于无人机的着陆雷达;讨论了战术多模式机载雷达、反舰导弹(ASCM)导引头和鱼雷导引头。

第 3 章分析了 LPI 波形的模糊函数以量化其时延-多普勒性能,这些概念贯穿了第一部分以分析所研究的各种波形,所用的数学工具包括自相关函数(ACF)、周期自相关函数(PACF)和周期模糊函数(PAF),还讨论了对 PAF 加权的效果。低截获概率工具箱(LPIT)是一个 MATLAB 程序包,可以使学生快速地设计所有的 LPI 波形。LPIT 的介

绍见附录 A,附录 B 讨论了从 N. Levanon 网站下载 MATLAB 程序代码来计算 ACF、PACF 和 PAF 的问题。

第 4 章阐述了调频连续波(FMCW) LPI 雷达的特征;分析了一种详细的结构;推导了发射波形和接收信号的数学公式,并分析了必须克服的收发隔离问题(对单天线系统);描述了搜索模式的信号处理,包括系统部件的细节(如滤波器带宽、模数转换速度等),也介绍了跟踪模式的信号处理;讲述了扫频波形的非线性;分析了 FMCW 的 PAF;作为一个例子详细介绍了 PANDORA (Parallel Array for Numerous Different Operational Research Activities);最后介绍了 LFM CW 发射机的技术发展趋势和最新发展动态。

第 5 章讨论了相移键控(PSK) LPI 雷达;详细介绍了多相巴克序列、Frank 编码、P1、P2、P3 和 P4 码及其频谱和模糊函数性能,还介绍了多时码  $T1(n)$ 、 $T2(n)$ 、 $T3(n)$  和  $T4(n)$ ;作为相位编码 LPI 雷达的例子,详细介绍了全向 LPI 雷达。

第 6 章讨论了频移键控(FSK)雷达波形的设计;介绍了 Costas 编码的设计,通过 PSK 和 Costas 编码的组合,使得 LPI 雷达获得额外的好处;介绍了这样一个概念,改变 FSK/PSK 波形以适应于感兴趣目标的功率谱密度,通过(随机地)发射与目标共振最大的频率,能够改善系统的探测概率,并给出了一些波形的例子。

第 7 章介绍了随机噪声雷达的概念,一共有四种类型:随机噪声、随机噪声加 FM-CW,随机噪声 FMCW 加正弦波和随机二相码调制;讨论了这些波形的模糊函数,以及雷达接收机中采用的相关接收机技术,包括声和光的方法。

第 8 章讨论了超视距雷达的概念,并强调了从常规 FMCW 波形到良好 LPI 波形的改进;介绍了电离层效应以及地波与天波发射机的概念,并定量分析了两种发射机的最大探测距离。

第 9 章讨论了反舰导弹 LPI 导引头的设计;描述了一个用于探测低雷达截面积(RCS)舰船的 9.3GHz 零差拍三角波 FMCW 现代发射机的设计;在发射机以 300m/s 的速度飞行,在距离目标 15nm 开机的场景下建立了杂波和目标的模型;采用将归一化的平均海面后向散射系数表述为擦地角函数的二阶多项式来描述每种海况(0~4)的特性。发射机的发射功率要及时地与目标特性相适应(功率),发射机发射的功率电平要与目标的 RCS 和距离相一致以使目标与杂波的功率比保持在 20dB。为了分析探测性能, RCS 考虑为  $50\text{m}^2$ 、 $100\text{m}^2$  和  $500\text{m}^2$ 。

第 10 章介绍了网络中心战的概念,分析了传感器网络的应用,定量描述了信息网络的性能;介绍了网络雷达的概念,回顾了最小输入和最小输出技术;采用 MATLAB 程序 LPIsimNet 分析了传感器网络和网络雷达的性能,包括在电子战中的容量;还讨论了正交多相调制和正交跳频波形的应用。

## 第二部分 截获接收机策略及其信号处理

作为第二部分的开篇,第 11 章关注的是(非合作)数字截获接收机的策略,目前的趋势是向全数字接收机发展,其模拟到数字的转换直接在天线端完成(直接转换);讨论了网络中心和群截获的策略、各种接收机结构的折中以及一种新的模拟到信息的数字接收机;介绍了截获接收机必须涉及的问题和截获接收机结构未来的趋势。在余下的章节中,假

设采样的信号可以从大容量的存储器中获得,并作为信号处理器的输入。

第 12 章阐述了 Wigner-Ville distribution (WD) 时频分析技术,包括有助于提高运算速度的高效核变换方法,通过两个小例子(实输入信号和复输入信号)的运行演示了 WD 时频计算;分析了双音信号以深化对 WD 输出的理解和展示交叉项的存在;尽管二进制 PSK(BPSK)不是 LPI 波形,但先对其进行不同信噪比(SNR)的信号分析,可以验证 WD 的效果并与其它相位编码技术进行比较;详述了信号参数的提取方法,如码周期、子码周期、相位编码数目、载波频率和信号带宽,分析了第一部分所述的 LPI 波形,包括 FM-CW 技术和相位编码技术:Frank、P1、P2、P3 和 P4,随后又阐述了在整个码周期中子码宽度非均匀的先进相位编码技术,包括  $T1(n) \sim T4(n)$ 。采用 WD,即使 SNR 低到一定程度,许多的 LPI 信号也可以被辨别,信号的参数可以被提取;最后阐述了频率编码技术,包括 Costas 序列(FSK)、带相位调制的 Costas 序列(FSK/PSK)和与目标匹配的 FSK/PSK 信号。

第 13 章论述了 Choi-Williams 分布,这种分布使用指数核和相同的变换作为 Wigner-Ville 分布的轮廓,其交叉项的幅度得到了明显的减少,使得调制参数的识别更加容易;采用 Choi-Williams 计算 LPI 调制,可以确定交叉项幅度减少的数量,并与第 12 章的相应结果进行比较;阐述了 LPI 调制,包括 FMCW、BPSK、多相调制以及多时、FSK、FSK/PSK 调制。

第 14 章阐述的是用于提取 LPI 雷达波形参数的正交镜像滤波器组(QMFB),首先介绍了时频小波和小波变换,推导了离散两通道正交镜像滤波器组,并讨论了对低通成分和高通成分分别进行滤波以及将滤波器组织成树形结构;然后,以单频复信号的处理结果作为时频输出的例子讨论了利用 QMFB 树,并以双频复信号为例对 LPI 信号进行了 QMFB 分析;最后利用上述方法对第 12 章和第 13 章中的 LPI 波形进行了分析,并对其结果进行了直接比较。

第 15 章介绍了循环平稳信号处理的基础;讨论了产生谱相关密度的离散时间算法,包括时间平滑 FFT 积累法和直接频率平滑法;讨论了两种方法对一个单一测试频率在双频平面上的循环平稳处理结果。与第 12 章到第 14 章讨论的时频方法相比,在双频平面上进行的波形参数提取具有一些显著的优势。

第 16 章介绍了采用反辐射导弹(ARM)的集成防御系统压制的概念;详细介绍了 ARM 寻的器和信号处理,以及对付 LPI 威胁的一些算法;分析了各国主要的 ARM 及其性能,同时回顾了反 ARM 的技术。

第 17 章讨论了利用时频图像和检测对信号调制进行自动分类的技术;强调了分类依据及人机接口;介绍了特征提取算法和非线性神经网络分类结构;论述了在第一部分中讨论的 LPI 发射机调制的分类结果。

第 18 章介绍了利用时频和双频处理自动提取调制参数和算法;论述了发射机聚类的概念和采用 WD-Radon 变换算法提取多相调制参数的算法,以及利用 QMFB 进行多相调制参数提取的方法;论述了一种从循环平稳双频平面提取 FMCW 参数的算法,其结果展示了这一技术的性能。

## 结束语

尽管我已尽最大努力来确保本书中所有材料的正确性,包括光盘中附带的诸多 MATLAB 程序,我还是要感谢那些指出书中错误的读者。

我很高兴这本书能够如此成功,第 2 版中的改进和补充尽量采纳了公司和大学里的诸多导师及学生们的反馈和建议。

最后,就我个人而言,那些研究和学习 LPI 雷达系统检测和分类的读者对第 1 版的肯定使我备受鼓舞,我也很希望增加了新章节和软件的第 2 版不仅有益于新读者,而且有益于第 1 版的老读者。

## 致 谢

本书在写作过程中,没有得到相应的帮助、鼓励和支持是难以完成的。首先我要感谢上帝给予了我完成这一工作的力量和耐性。我还想感谢我的家人 Ann、Amanda、Zachary 和 Molly,是他们在本书从第 1 版到第 2 版的完稿过程中给予的支持、耐心、牺牲以及对太多我所疏忽日子的理解,促成了我能够完成这一艰巨的任务,对本书付出的还有他们。

回顾第 1 版的工作,我还要感谢以下给予我宝贵帮助的人。首先,我要感谢 ANRO 工程公司的 David K. Barton 博士和 Syracuse 研究协会公司的 Richard G. Wiley 博士,感谢他们花了很多时间为提高本书稿的质量所给的建设性意见。我还要感谢 Tel Aviv 大学的 Nadav Levanon 教授,感谢他在模糊度分析方面与我一起孜孜不倦的工作;感谢海军研究生院的 Herschel H. Loomis Jr. 教授,感谢他在循环平稳信号处理方面的有益探讨。我还要感谢 Cincinnati 大学的 David Styer 教授,是他让我分享了在数论领域的独到见解。

对第 2 版各个部分给予帮助的同仁:澳大利亚空军的防御分析和顾问工程师 Carlo Kopp 博士,感谢他在反辐射武器方面的独特视角;Penn 州立大学的 Ram Narayanan 博士,感谢他在噪声雷达方面给予的帮助;海军研究生院的 Jeffrey B. Knorr 博士、David Barton 博士和 Richard Wiley 博士,感谢他们在高频领域多年的经验。我还要感谢研究生 Fernando Ta-boada、Antonio Lima、Jen Gau、Pedro Jarpa、Siew-Yam Yeo 和 Christer Persson、Taylan Gulum、You-Chen、Bin-Yi Liu、You-Quan Chen、Teresa 和 Gary Upperman、Patrick Kistner、Eugene R. Heuschel III、Micael Grahn、Jason Phillips、Pick Guan Hui 和 Sharon Ai Lin Tan,感谢他们在协助开发软件工具中所做的努力,还要感谢诸多研究生在理解本书结果中所付出的宝贵时间。

我也要感谢 Artech 出版社的全体职员,尤其感谢高级策划编辑 Mark Walsh 对第 2 版的策划、支持和合作;感谢开发编辑 Barbara Lovenvirth 一直对我的帮助;感谢生产编辑 Erin Donahue 对本书的制作,Igor Valdman 对封面制作的管理。这些都是令人满意而又艰巨的工作。

Phillip E. Pace

于加利福尼亚州蒙特雷·海军研究生院

pepace@nps.edu

# 目录

## 第一部分 低截获概率雷达设计基础

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第 1 章 发现与不被发现       | 2  |
| 1.1 LPI 的需求         | 2  |
| 1.2 LPI 雷达的特点       | 3  |
| 1.2.1 天线的考虑         | 3  |
| 1.2.2 超低旁瓣的获取       | 4  |
| 1.2.3 天线的搜索扫描样式     | 6  |
| 1.2.4 先进的多功能射频概念    | 8  |
| 1.2.5 发射机的考虑        | 9  |
| 1.2.6 功率管理          | 10 |
| 1.2.7 载频的考虑         | 10 |
| 1.3 LPI 雷达的关键——脉冲压缩 | 11 |
| 1.4 雷达探测距离          | 14 |
| 1.5 截获距离            | 16 |
| 1.6 雷达距离和截获距离的对比    | 18 |
| 1.7 Pilot LPI 雷达    | 19 |
| 1.8 结束语             | 23 |
| 参考文献                | 23 |
| 习题                  | 24 |
| 第 2 章 LPI 技术及其应用    | 26 |
| 2.1 高度计             | 26 |
| 2.1.1 引言            | 26 |
| 2.1.2 野战 LPI 高度表    | 27 |
| 2.2 着陆系统            | 29 |
| 2.2.1 引言            | 29 |
| 2.2.2 野战 LPI 着陆系统   | 29 |
| 2.3 监视和火控雷达         | 30 |
| 2.3.1 战场知觉          | 30 |
| 2.3.2 LPI 陆基系统      | 30 |
| 2.3.3 LPI 机载系统      | 35 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 2.4 反舰导弹和鱼雷导引头            | 36 |
| 2.4.1 水面海军的严重威胁           | 36 |
| 2.4.2 野战 LPI 导引头系统        | 37 |
| 2.5 LPI 雷达系统总结            | 39 |
| 参考文献                      | 40 |
| 习题                        | 41 |
| <b>第 3 章 LPI 波形的模糊度分析</b> | 42 |
| 3.1 模糊函数                  | 42 |
| 3.2 周期自相关函数               | 42 |
| 3.3 周期模糊函数                | 43 |
| 3.3.1 周期模糊函数的周期性          | 44 |
| 3.3.2 峰值电平和综合旁瓣电平         | 44 |
| 3.4 Frank 相位调制示例          | 44 |
| 3.4.1 发射波形                | 45 |
| 3.4.2 仿真结果                | 45 |
| 3.5 降低多普勒旁瓣               | 48 |
| 参考文献                      | 49 |
| 习题                        | 49 |
| <b>第 4 章 FMCW 雷达</b>      | 51 |
| 4.1 FMCW 的优点              | 51 |
| 4.2 单天线 LPI 雷达的目标检测       | 52 |
| 4.3 发射波形设计                | 54 |
| 4.3.1 三角波                 | 54 |
| 4.3.2 波形频谱                | 56 |
| 4.3.3 线性调频波形的产生           | 57 |
| 4.4 收发隔离                  | 59 |
| 4.4.1 传输线的基本原理            | 59 |
| 4.4.2 采用环形器的单天线隔离度        | 60 |
| 4.4.3 采用反射功率对消器的单天线隔离度    | 61 |
| 4.5 接收信号                  | 63 |
| 4.6 LPI 搜索模式处理            | 63 |
| 4.7 跟踪模式处理技术              | 66 |
| 4.8 扫频非线性的影响              | 67 |
| 4.9 动目标显示滤波               | 68 |
| 4.10 匹配接收机响应              | 68 |
| 4.11 失配接收机响应              | 70 |
| 4.12 PANDORA FMCW 雷达      | 71 |
| 4.13 电子攻击的考虑              | 72 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 4.14 调频连续波发射机的技术趋势 .....         | 72  |
| 参考文献 .....                       | 75  |
| 习题 .....                         | 77  |
| <b>第5章 相移键控技术</b> .....          | 79  |
| 5.1 引言 .....                     | 79  |
| 5.2 发射信号 .....                   | 80  |
| 5.3 二相码 .....                    | 80  |
| 5.4 多相码 .....                    | 83  |
| 5.5 多相巴克码 .....                  | 84  |
| 5.6 Frank 编码 .....               | 92  |
| 5.7 P1 码 .....                   | 95  |
| 5.8 P2 码 .....                   | 97  |
| 5.9 P3 码 .....                   | 98  |
| 5.10 P4 码 .....                  | 100 |
| 5.11 多时编码 .....                  | 103 |
| 5.11.1 $T1(n)$ 码 .....           | 103 |
| 5.11.2 $T2(n)$ 码 .....           | 105 |
| 5.11.3 $T3(n)$ 码 .....           | 107 |
| 5.11.4 $T4(n)$ 码 .....           | 110 |
| 5.12 全向 LPI 雷达 .....             | 112 |
| 5.13 总结 .....                    | 114 |
| 参考文献 .....                       | 114 |
| 习题 .....                         | 115 |
| <b>第6章 频移键控技术</b> .....          | 118 |
| 6.1 FSK 的优点 .....                | 118 |
| 6.2 FSK 连续波信号的描述 .....           | 119 |
| 6.3 FSK 雷达的距离计算 .....            | 119 |
| 6.4 Costas 编码 .....              | 120 |
| 6.4.1 Costas 阵列或序列的特性 .....      | 120 |
| 6.4.2 差分三角形的计算 .....             | 121 |
| 6.4.3 Costas 序列的周期模糊函数推导 .....   | 121 |
| 6.4.4 Costas 阵列的 Welch 构造法 ..... | 122 |
| 6.5 FSK/PSK 混合技术 .....           | 123 |
| 6.5.1 FSK/PSK 信号的描述 .....        | 123 |
| 6.5.2 FSK/PSK 信号的性能 .....        | 124 |
| 6.6 匹配的 FSK/PSK 信号 .....         | 125 |
| 6.7 结束语 .....                    | 128 |
| 参考文献 .....                       | 129 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 习题                     | 129 |
| 第7章 噪声技术               | 131 |
| 7.1 历史回顾               | 131 |
| 7.2 超宽带的考虑             | 133 |
| 7.3 随机噪声雷达的原理          | 134 |
| 7.4 Narayanan 随机噪声雷达设计 | 136 |
| 7.4.1 工作特性             | 137 |
| 7.4.2 RNR 发射机的模型       | 138 |
| 7.4.3 周期模糊的结果          | 139 |
| 7.5 随机噪声+FMCW 雷达       | 141 |
| 7.5.1 RNFR 的频谱         | 141 |
| 7.5.2 RNFR 发射机模型       | 142 |
| 7.5.3 周期模糊的结果          | 143 |
| 7.6 随机噪声 FMCW+正弦       | 144 |
| 7.6.1 RNFSR 发射机模型      | 146 |
| 7.6.2 周期模糊的结果          | 147 |
| 7.7 随机二相调制             | 148 |
| 7.7.1 RBPC 发射机模型       | 149 |
| 7.7.2 周期模糊的结果          | 149 |
| 7.8 毫米波噪声雷达            | 150 |
| 7.9 相关接收机技术            | 151 |
| 7.9.1 理想相关             | 151 |
| 7.9.2 数模相关             | 152 |
| 7.9.3 全数字相关            | 152 |
| 7.9.4 声光相关             | 153 |
| 7.10 结束语               | 154 |
| 参考文献                   | 155 |
| 习题                     | 157 |
| 第8章 超视距雷达              | 158 |
| 8.1 OTHR 的两种类型         | 158 |
| 8.2 天波 OTHR            | 159 |
| 8.2.1 电离层特性            | 160 |
| 8.2.2 F2 层传播特性举例       | 164 |
| 8.2.3 多普勒杂波谱           | 164 |
| 8.2.4 天波 OTHR 系统举例     | 165 |
| 8.2.5 天波处理方法           | 167 |
| 8.3 天波 LPI 波形的考虑       | 168 |
| 8.3.1 相位调制技术           | 168 |