

无线电侦察 信号分析与处理

Signal Analysis
and Processing for Radio
Reconnaissance

$$S^{\alpha}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R^{\alpha}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

$$z = A^{-1} u$$

罗利春 著

国防工业出版社

National Defence Industry Press

<http://www.ndip.com.cn>

无线电侦察
信号分析与处理
Signal Analysis and Processing
for Radio Reconnaissance

罗利春 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

无线电侦察信号分析与处理/罗利春著. —北京:国防工业出版社, 2003. 1

ISBN 7-118-02626-3

I. 无... II. 罗... III. ①电子侦察—信号分析
②电子侦察—信号处理 IV. TN971

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 054400 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 11 $\frac{3}{8}$ 280 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 25.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

| | | | | | |
|-----------|-----|-----|-----|-----|--|
| 名誉主任委员 | 陈达植 | | | | |
| 顾问 | 黄宁 | | | | |
| 主任委员 | 殷鹤龄 | | | | |
| 副主任委员 | 王峰 | 张涵信 | 张又栋 | | |
| 秘书长 | 张又栋 | | | | |
| 副秘书长 | 崔士义 | 蔡镛 | | | |
| 委员 | 于景元 | 王小谟 | 甘茂治 | 冯允成 | |
| (按姓名笔画排序) | 刘世参 | 杨星豪 | 李德毅 | 吴有生 | |
| | 何新贵 | 佟玉民 | 宋家树 | 张立同 | |
| | 张鸿元 | 陈火旺 | 侯正明 | 常显奇 | |
| | 崔尔杰 | 彭华良 | 韩祖南 | 舒长胜 | |

序

无线电侦察是无线电频谱监测、电子对抗以及现代电子战所不可缺少的重要手段,而信号分析与处理是其核心技术。无线电侦察信号分析与处理技术是现代电子科学技术的一个重要应用领域。由于它自身任务的要求和所应用的电磁信号环境条件的限制,使得它存在着电子工程其它应用领域所没有的困难。正因为如此,它向人们提出了它本身特有的大量的技术难题。这些难题主要包括:对所截获的未知无线电信号,在缺乏信号本身的先验知识和在多种干扰条件下,估计它的发射源距离、功率和方向;以所截获的无线电信号波形为依据,提取其各种特征参数及分布规律;分析、识别和判决所截获无线电信号的调制种类,并由此推断其发射电台的型号;由上述分析结果,估计与判决无线电信号发射源身份;对所截获的未知无线电信号进行信源恢复;对网络无线电信号进行身份确认等。正是这些直到今天仍未解决的技术难题,召唤着一些有志者投身于它的研究。在国际电子通信与信号处理领域,这些问题也是极具挑战性的。因此,无线电侦察本身也构成了现代电子科学技术的一个重要的创新源泉。同时,由于其应用范围与市场效益的限制,又使得它很难吸引更多的人去从事其艰苦的基础性研究。这就更需要在这个领域工作的人们具有甘于寂寞、勤于耕作的朴实作风。否则,就难以有所作为。

《无线电侦察信号分析与处理》一书,就是作者罗利春同志在无线电侦察技术领域埋头耕耘与辛勤劳动的结晶。它是集作者在该领域多年潜心学习、研究和工程实践的积累而写成的。本书深入研究了无线电侦察信号分析与处理的基本理论和应用问题,是

我国无线电侦察信号分析与处理领域尚不多见的学术专著。其主要内容包括:基于 FFT 的信号谱分析及其改进;信号 AR 参数谱估计与谱相关分析;信号时频分析与相位分析;信号调制识别与分类;无线电测向;无线电信号的传播反演;无线电侦察的排队问题处理以及无线电侦察方法论与信号反演等。这些理论和技术,对无线电侦察信号分析与处理都是必需的。书中所介绍的内容,都经过了作者所进行的计算机模拟或实际工程的检验。这是一本既有较好的信号处理基本理论分析,又有实际工程应用的专著。可供国内无线电侦察技术领域的科研、教学和工程参考使用。

我相信,本书的出版,将会有助于我国无线电侦察技术的发展。

肖先赐

2001 年 2 月于电子科技大学

前 言

法拉第观测到电磁转换;麦克斯韦总结电磁基本定理、提出位移电流概念并预言电磁波的存在;赫兹产生出电磁波;马可尼和波波夫分别进行无线电报通信试验……这些无线电发现与发明史上的开创性事件,无疑也是人类文明进步最重要的标志之一。无线电的诞生,使得无线电通信、广播、雷达、导航、航空航天、电子战与信息战等现代科技能够随之应运而生,并不断为人类文明创造出新的财富与竞争手段。今天,无论是在国防还是在社会生活的其它各个方面,无论是在和平发展还是在现代高技术战争中,无线电与电子科学技术都比以往扮演着更加重要的角色,人类都比以往更加离不开它的存在。

无线电侦察及其信号分析与处理是现代无线电与电子工程的一个有着很长历史的重要分支。在信息技术迅猛发展的今天,其军事价值与民用前景都更加突出与广阔。因此,发展其理论与技术,既是它自身的需要,更是时代的要求。而国内目前这方面的专门著作尚不多见。鉴此,笔者谨以其浅陋之学识,将自己在这领域学习和工作的积累加以总结与提炼,形成本书。希望对有关科研、教学、工程应用及管理有所裨益。

本书不是包罗万象的。如对无线电侦察十分重要的信道反演及数字通信调制码与信源码反演(盲解调),由于其理论与技术尚待完善,本书就未展开讨论。另外,本书所述基本方法也非面面俱到。如对以最小均方(LMS)算法为标志的自适应信号处理、高阶谱、神经网络和混沌等信号处理技术,由于已有一些专著讨论,加之笔者研究侧重点的限制,本书也未涉及。

本书着重讨论无线电侦察信号分析与处理中笔者研究过的某

些基本方法的数学原理与试验性能评估,以及解决某些难题的方法构想。全书共分9章。第1章介绍无线电侦察的基本任务与方法;第2章讨论无线电侦察信号FFT谱分析概念,DTFT谱分析,补零FFT、Zoom FFT、CZT和笔者提出的频谱多次平移与排列等FFT谱改进方法;第3章论述信号的参数谱与谱相关概念、信号AR谱估计与谱相关方法等;第4章讨论无线电信号时频与相位分析概念、基于希尔伯特变换的瞬时频率与相位估计、用维格纳-威利时频分布估计信号瞬时频谱、用子波变换检测信号相位特征等方法,其中补正了原始文献的某些概念失误;第5章讨论无线电信号调制识别与分类的基本原理及典型方法,并补充原始文献未提供的重要推导和笔者对其差错的修正;第6章研究无线电测向与方向反演问题,包括空间谱测向和非测向方法方向反演等;第7章讨论无线电侦察传播反演,包括无线电侦察与电波传播的关系、信号的传播反演和地波模型反演等;第8章研究无线电侦察中的排队问题;第9章探讨无线电侦察信号处理方法论与信号的反演处理问题。

本书讨论的方法,既有从国内外有关作者以及笔者本人已发表的文献中引用的,也有从笔者未曾发表过的工作(包括其学位论文)中引用的。这些方法都经过了笔者实际应用或计算机仿真的检验。因此,书中不乏笔者经过思考、研究和实验而得出的对各种方法的理解与议论。尽管它们可能不正确,但由于在实际应用中,对方法的正确认识与评价往往比方法本身更重要,因此,作为实现这种正确评价的一种努力,这些理解与议论就权当献身说法吧。

笔者在无线电侦察信号分析与处理学习研究中感到,一种方法,只有当它获得数学的支持时,它才具有最现实的理性基础和最长远的发展潜力。综观信号分析与处理的历史不难发现,真正的原始创新几乎都借助了数学的力量。而要掌握别人的创新,也离不开数学。为了推导与论证,本书也较多地运用了数学公式与数学概念,读者阅读时应有一些数学基础。主要包括高等数学、工程数学、高等代数、随机过程、优化理论、排队论等。如能再读点集合

论、泛函分析、近世代数、实分析及调和分析等的初步内容,则将对剖析有关方法和批评本书大有裨益。

本书得以问世,首先应归功于所有关心和帮助过笔者的老师、领导、同事和朋友。因篇幅所限,憾不能一一列举。感谢笔者所在单位及上级领导对笔者的关怀并批准本书申请国防科技图书出版基金。感谢陈太一、沙踪、肖先赐和侯印鸣等电子学前辈对笔者研究工作的肯定并对本书给予评价和推荐,以及肖老师为之热情作序。感谢国防科技图书出版基金评审委员会严肃认真评审书稿、指导修改和确认给予资助。感谢邹文森、万学法、马世林、罗勇进、刘凯、杨屹伟、简明、孙永全、张清毅、温志津、齐亚平、焦燕等同志,西南电子电信技术研究所、电子 22 所、58046 部队、外交部通信总台、电子科技大学等单位,以及本所情报资料室、国家图书馆、中科院文献情报中心、国防科技情报中心,以及中国科情所等情报资料部门对本书所基于的笔者有关科研课题所给予的极大支持与帮助。此外,本书还得益于长期以来笔者所受到的许多师长的教诲。肖先赐老师在无线电侦察领域积极倡导现代谱估计与自适应信号处理技术研究、王越老师提出复杂系统的多范畴的对立统一律的系统理论、王崇厚老师对无线电侦察系统工程的丰富经验,以及他们曾给予笔者的悉心指导与热情关怀,都对本书的形成产生了重要影响;左湘源、陈洪渡、李传钰、施茂兴、李正良、肖化铸、李乐民、洪福明、蒋传纪、郑顺兴、朱中樑、江欲钊、徐穆洵、魏本涛、信俊明、韩文峻、肖佐、冯孔豫、熊皓、赵润、陈尚勤、张先迪、朱德君、虞厥邦、李瑞彬、黄顺吉、张煦、黄香馥、靳蕃、王永德、王炎芳、柯有安、唐斌、魏平等老师,曾先后教授笔者各个时期的数学与信号理论学习,或指导笔者的科研,或评审笔者的成果与学位论文,或与笔者进行有益讨论;IEEE 等期刊的不知名审稿人批评指导笔者论文,本书责任编辑王祖珮精心编辑书稿;罗让、刘志辉、刘伯骏、秦文清、刘振兴等许多师长和朋友热忱关心笔者;侯海燕等家人全力支持笔者对本书的全身心投入……所有这些,都是本书得以问世的不可缺少的重要前提条件。借此机会向他们致以崇高的敬意和由

衷的感谢!

笔者水平有限,书中必有疏漏和错误。祈盼各位老师、专家和读者不吝指正!

罗利春

2001年5月于北京

目 录

| | |
|--|----|
| 第 1 章 引论 | 1 |
| 1.1 无线电侦察的基本任务 | 1 |
| 1.2 无线电侦察信号分析与处理 | 1 |
| 1.3 主要方法与本书内容 | 3 |
| 1.4 超外差接收机的数学功能 | 6 |
| 第 2 章 无线电信号 FFT 谱分析 | 8 |
| 2.1 无线电侦察中的信号谱分析 | 8 |
| 2.2 谱分析的数学定义与主要方法 | 9 |
| 2.2.1 谱分析的起源与数学定义 | 9 |
| 2.2.2 信号频谱与功率谱的关系 | 11 |
| 2.2.3 信号谱分析的主要数学方法 | 13 |
| 2.3 无线电信号 DTFT 谱分析 | 14 |
| 2.3.1 信号 DTFT 谱定义与性质 | 14 |
| 2.3.2 信号 DTFT 谱的算法和计算实例 | 16 |
| 2.4 无线电信号 FFT 谱分析 | 21 |
| 2.4.1 信号 FFT 谱数学定义、性质和计算 | 21 |
| 2.4.2 信号 FFT 谱的优势与局限概述 | 23 |
| 2.5 FFT 谱改进——补零 FFT、Zoom FFT 与 CZT | 23 |
| 2.5.1 信号 FFT 谱改进概况 | 23 |
| 2.5.2 补零 FFT 的基本原理与算法 | 24 |
| 2.5.3 Zoom FFT 的基本原理与算法 | 25 |
| 2.5.4 CZT 的基本原理与算法 | 27 |
| 2.6 信号 FFT 谱新改进——谱平移与内插 | 29 |
| 2.6.1 信号 FFT 谱改进的可行性 | 29 |

| | | |
|------------|-------------------------|-----------|
| 2.6.2 | 谱平移与内插 | 33 |
| 2.6.3 | 应用举例 | 35 |
| 2.6.4 | 新方法特点 | 36 |
| 第3章 | 无线电信号参数谱估计与谱相关分析 | 40 |
| 3.1 | 无线电信号的谱估计与谱相关 | 40 |
| 3.1.1 | 谱估计及其对无线电侦察的意义 | 40 |
| 3.1.2 | 谱相关对无线电侦察的意义 | 42 |
| 3.2 | 无线电信号参数谱分析——AR 谱估计要点 | 43 |
| 3.2.1 | 参数谱估计基本原理 | 43 |
| 3.2.2 | AR 谱估计算法 | 48 |
| 3.2.3 | 一个确定 AR 模型阶数的经验公式 | 51 |
| 3.2.4 | AR 谱估计应用实例 | 54 |
| 3.3 | 无线电信号谱相关分析 | 55 |
| 3.3.1 | 无线电信号的随机性与非平稳性 | 55 |
| 3.3.2 | 非平稳随机过程的循环平稳特性 | 58 |
| 3.3.3 | 无线电信号的循环平稳性与谱相关 | 63 |
| 3.3.4 | 信号谱相关数学定义与物理解释 | 64 |
| 3.3.5 | 无线电信号的谱相关 | 70 |
| 3.3.6 | 信号谱相关算法 | 75 |
| 3.3.7 | 无线电信号谱相关计算实例 | 76 |
| 第4章 | 无线电信号时频与相位分析 | 81 |
| 4.1 | 无线电侦察与信号时频、相位分析 | 81 |
| 4.1.1 | 时频与相位分析对无线电侦察的意义 | 81 |
| 4.1.2 | 瞬时频谱的理论背景与实际存在性 | 82 |
| 4.1.3 | 时频与相位分析主要数学方法 | 85 |
| 4.2 | 基于希尔伯特变换的瞬时频率估计 | 87 |
| 4.2.1 | 希尔伯特变换的数学定义与傅里叶变换 | 87 |
| 4.2.2 | 解析函数、解析信号与希尔伯特变换 | 88 |
| 4.2.3 | 由解析信号估计瞬时频率 | 90 |
| 4.2.4 | 3种无线电信号的瞬时频率估计 | 92 |

| | | |
|------------|-------------------------------------|------------|
| 4.3 | 用维格纳-威利时频分布估计信号瞬时频谱 | 96 |
| 4.3.1 | 数学定义与算法 | 96 |
| 4.3.2 | 用维格纳-威利时频分布分析无线电信号 | 99 |
| 4.4 | 用子波变换极大模检测信号相位特征 | 103 |
| 4.4.1 | 子波变换——起源、优势与局限 | 103 |
| 4.4.2 | 用哈尔子波变换极大模估计相位突变点 | 107 |
| 4.4.3 | 用莫奈特子波变换极大模估计相位突变点 | 111 |
| 4.4.4 | 几个无线电信号的子波变换极大模 | 125 |
| 4.4.5 | 关于用子波变换脊检测信号的相位特征 | 128 |
| 第5章 | 无线电信号调制识别与分类 | 130 |
| 5.1 | 无线电信号调制识别与分类概论 | 130 |
| 5.1.1 | 调制识别与分类概念 | 130 |
| 5.1.2 | 调制识别与分类的基本途径 | 131 |
| 5.1.3 | 分类特征构造方法及其理论基础 | 132 |
| 5.2 | 差分相位简化加权的调制分类 | 134 |
| 5.2.1 | 数字相位调制信号的差分相位特征 | 134 |
| 5.2.2 | 调制分类特征—— $\Delta\phi$ 及其加权似然比 | 135 |
| 5.2.3 | $W(\Delta\phi)$ 调制分类蒙特卡罗试验性能 | 137 |
| 5.3 | 采用准对数似然比(qLLR)的调制分类 | 138 |
| 5.3.1 | qLLR 分类的基本原理及其推导 | 138 |
| 5.3.2 | qLLR 调制分类试验性能 | 142 |
| 5.4 | 采用 n 阶相位统计矩进行调制分类 | 143 |
| 5.4.1 | 基本原理与相位偶阶矩的单调性 | 143 |
| 5.4.2 | 采用相位统计矩的 MPSK 调制分类 | 150 |
| 5.5 | 采用不同阶幅度统计矩的调制分类 | 151 |
| 5.5.1 | QPSK/16QAM 信号 2 阶/4 阶幅度矩 | 151 |
| 5.5.2 | QPSK/16QAM 的鉴别特征及分类器 | 152 |
| 5.5.3 | QPSK/16QAM 的分类性能 | 154 |
| 5.6 | ISI 环境中的调制分类 | 155 |
| 5.6.1 | 带限信道、ISI 与调制分类 | 155 |

| | | |
|--------------|---------------------------|------------|
| 5.6.2 | ISI 环境下 GLRT 调制分类原理 | 163 |
| 5.6.3 | GLRT 调制分类器性能 | 170 |
| 5.7 | 用高阶相关代替似然比进行调制分类 | 171 |
| 5.7.1 | 高阶相关与似然比检验 | 171 |
| 5.7.2 | 高阶相关 MFSK 调制分类器 | 184 |
| 5.7.3 | 4 种分类器的门限设置 | 187 |
| 5.7.4 | 试验性能 | 188 |
| 5.8 | 其它调制识别与分类方法 | 190 |
| 第 6 章 | 无线电测向信号处理 | 191 |
| 6.1 | 无线电测向与方向反演 | 191 |
| 6.2 | 空间谱估计算法及性能 | 193 |
| 6.2.1 | 空间谱估计算法的分类 | 193 |
| 6.2.2 | 2 个基本算法及性能评估 | 193 |
| 6.3 | 空间谱估计算法与通道失配 | 198 |
| 6.3.1 | 工程实现中的通道失配问题 | 198 |
| 6.3.2 | MUSIC 对通道失配的宽容性 | 199 |
| 6.3.3 | 其它几种算法对通道失配的宽容性 | 203 |
| 6.3.4 | 通道相位失配的估计 | 205 |
| 6.4 | 通道失配无源校正算法的收敛性分析 | 206 |
| 6.4.1 | 无源校正算法原理与推导 | 206 |
| 6.4.2 | 算法的收敛性分析 | 209 |
| 6.4.3 | 算法收敛的充要条件 | 212 |
| 6.5 | 1 维噪声子空间谱估计测向算法 | 213 |
| 6.5.1 | MUSIC 算法的 2 个实际问题 | 213 |
| 6.5.2 | 1 维噪声子空间算法 | 215 |
| 6.5.3 | 特征值泄漏与算法性能 | 217 |
| 6.5.4 | 运算量的改善 | 218 |
| 6.6 | 空间谱估计快拍数与目标源平稳性 | 219 |
| 6.7 | MUSIC 分辨相干源的仿真性能 | 221 |
| 6.7.1 | 理论预测 | 221 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 6.7.2 | 仿真试验性能 | 222 |
| 6.8 | 空间谱估计测向超性能机理分析 | 224 |
| 6.9 | 基于非测向方法的无线电信号方向反演 | 228 |
| 6.9.1 | 非测向方向反演的基本原理 | 228 |
| 6.9.2 | 非测向方法与测向方法定性比较 | 230 |
| 6.10 | 无线电信号方向反演与电波传播 | 230 |
| 6.10.1 | 方向反演与电波传播 | 230 |
| 6.10.2 | 2个电波传播问题 | 233 |
| 第7章 | 无线电侦察传播反演 | 235 |
| 7.1 | 传播反演概论 | 235 |
| 7.1.1 | 无线电侦察与电波传播 | 235 |
| 7.1.2 | 传播反演的目的、定义及概念 | 236 |
| 7.1.3 | 传播距离反演的基本原理 | 237 |
| 7.1.4 | 传播模型反演的基本原理 | 238 |
| 7.1.5 | 地波传播的意义 | 239 |
| 7.2 | 地波传播模型概况 | 240 |
| 7.2.1 | 关于地波的成分 | 240 |
| 7.2.2 | 地波传播研究简要回顾 | 240 |
| 7.2.3 | 一般地波传播特性 | 241 |
| 7.2.4 | 几个主要地波传播模型 | 244 |
| 7.3 | 现有地波传播模型的应用与局限 | 246 |
| 7.3.1 | 从实验看城市地波传播规律 | 246 |
| 7.3.2 | 现有地波传播模型在城市地形的检验 | 247 |
| 7.4 | 一个用于城市地形的地波传播新模型 | 248 |
| 7.4.1 | 新模型的基本思想与特点 | 248 |
| 7.4.2 | 新模型计算公式 | 249 |
| 7.5 | 新模型反演过程与使用方法 | 252 |
| 7.5.1 | 新模型反演过程之一——基准损耗与 σ 和 ϵ 的确定 | 252 |
| 7.5.2 | 新模型反演过程之二——额外损耗与建筑群 | |