

WILEY



国防电子信息技术丛书

Automatic Modulation Classification
Principles, Algorithms and Applications

自动调制样式分类

—— 原理、算法与应用

Zhechen Zhu (朱哲辰) [英] Asoke K. Nandi 著

王建涛 张春磊 陈柱文 沈 涛 译

楼才义 邹少丞 审校



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

国防电子信息技术丛书

自动调制样式分类 ——原理、算法与应用

Automatic Modulation Classification
Principles, Algorithms and Applications

Zhechen Zhu (朱哲辰) [英]Asoke K. Nandi 著

王建涛 张春磊 陈柱文 沈 涛 译

楼才义 邹少丞 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书介绍了可用于通信信号自动调制样式分类的多种算法,包括过去 20 年开发的主要方法。本书将相关算法系统地分为 5 类:基于似然的分类器、基于分布检验的分类器、基于特征的分类器、机器学习辅助的分类器、盲调制样式分类器。对于每一种调制样式分类器,本书都列出了基本假设与系统需求,并利用数学表达式、图示、编程伪码等方式说明了设计实现过程。最后,还通过理论分析和数值仿真实验两种方式对各种自动调制样式分类器的性能进行了比较。

本书适合通信等相关领域的高年级本科生、研究生和工程技术人员阅读。

Automatic Modulation Classification: Principles, Algorithms and Applications, ISBN: 9781118906491

Zhechen Zhu, Asoke K. Nandi

Copyright©2015 John Wiley & Sons, Ltd.

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Publishing House Of Electronics Industry and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons, Limited.

本书简体中文版专有翻译出版权由 John Wiley & Sons, Ltd. 授予电子工业出版社,中文版权属于 John Wiley & Sons, Ltd. 和电子工业出版社共有。未经许可,不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

本书封底贴有 John Wiley & Sons, Ltd. 防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2018-7266

图书在版编目(CIP)数据

自动调制样式分类:原理、算法与应用/朱哲辰,(英)阿索克·K.南迪(Asoke K. Nandi)著;王建涛等译.
—北京:电子工业出版社,2019.1

(国防电子信息技术丛书)

书名原文:Automatic Modulation Classification: Principles, Algorithms and Applications

ISBN 978-7-121-35915-6

I. ①自… II. ①朱… ②阿… ③王… III. ①调制技术 IV. ①TN76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 011587 号

策划编辑:竺南直

责任编辑:竺南直

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

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:8.25 字数:210 千字

版 次:2019 年 1 月第 1 版

印 次:2019 年 1 月第 1 次印刷

定 价:39.00 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, 88258888。

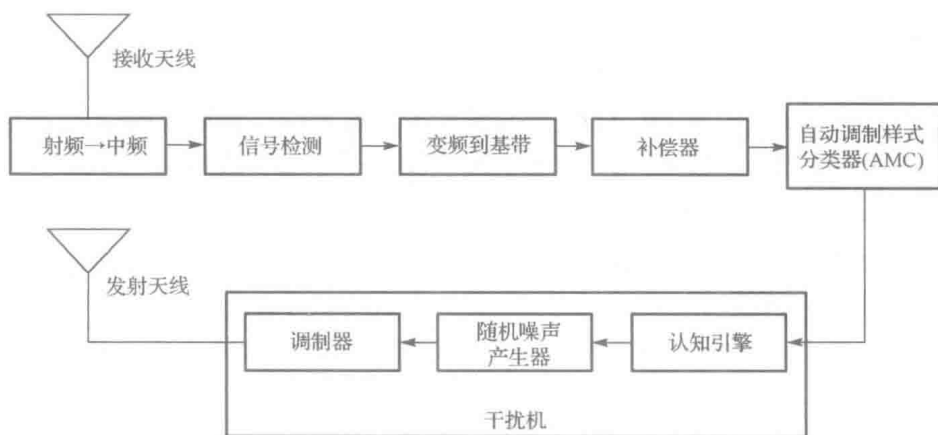
质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: davidzhu@phei.com.cn。

译者序

——落花时节方逢君

调制样式分类无论在民用领域(如链路自适应通信领域),还是在军用领域(如电子战领域),都有着非常重要的作用。而且,随着人工智能、大数据等领域的崛起,调制样式分类的自动化、智能化也已经取得了诸多进展。例如,美国弗吉尼亚理工大学(Virginia Tech)所开发的认知干扰机(CJ,系统框图如下图所示)项目,就将自动调制样式分类器(AMC)作为非常重要的一个组成部分和关键环节。



鉴于此,我们翻译了这本《自动调制样式分类——原理、算法与应用》。该书系统介绍了学术界主流的调制样式分类器,并对其分类性能、具体应用等相关内容进行了阐述。该书共10章,主要内容包括:第1章“概述”,介绍了自动调制样式分类的具体应用,以及调制样式与通信系统基础(模拟/数字调制样式、信道效应的影响等);第2章“调制样式分类信号模型”,介绍了几种典型信道效应下的信号模型,包括加性高斯白噪声(AWGN)信道中的信号模型、衰落信道中的信号模型、非高斯噪声信道中的信号模型;第3章“基于似然的分类器”,介绍了最大似然分类器、未知信道参数的似然比检验、降低复杂度的方法;第4章“基于分布检验的分类器”,介绍了科尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫(KS)检验分类器、克莱默-冯·米塞斯检验分类器、安德森-达令检验分类器、优化的分布采样检验分类器;第5章“调制样式分类的特征”,介绍了基于信号频谱的特征、基于小波变换的特征、基于高阶统计的特征、基于循环平稳分析的特征;第6章“利用机器学习实现调制样式分类”,介绍了 k 最近邻分类器、支持向量机分类器、利用逻辑回归实现信号特征组合、利用人工神经网络实现信号特征组合、利用遗传算法实现信号特征选择、利用遗传编程实现信号特征选择与信号特征组合;第7章“盲调制样式分类”,介绍了期望最大化的基于似然的分类器、最小距离质心估计与非参数似然分类器;第8章“各种调制样式分类器的比较”,介绍了系统要求及适用的调制样式、加性噪声情况下的分类准确度、信号长度有

限情况下的分类准确度、存在相位偏移时的分类鲁棒性、存在频率偏移时的分类鲁棒性、运算复杂度；第9章“民用调制样式分类”，介绍了对高阶调制样式的分类、链路自适应系统的调制样式分类、多输入多输出(MIMO)系统的调制样式分类；第10章“军用调制样式分类器设计”，介绍了调制样式池未知情况下的调制样式分类器设计，以及低检测概率信号调制样式分类器。

本书篇幅尽管不大，且偏技术性，但作为为数不多的全面介绍自动调制样式分类这一重要基础性电子信息技术的图书，本书具备非常高的参考价值，非常适合从事通信、电子战等领域的专家、研发人员、应用人员、管理人员、在校师生等读者阅读。

本书前言、第1章、第6章、第10章由张春磊翻译；第4章、第7章由王建涛翻译；第2章、第3章、第8章由陈柱文翻译；第5章、第9章由沈涛翻译。楼才义、邹少丞对全书进行了审校，王建涛对全书进行了统稿。该书的排版、公式编辑等工作得到了陈伟峰、陶晓佳、曹宇音、曹宇萌的无私帮助，出版、编辑方面得到了竺南直老师和王李军博士后的大力支持，在此深表谢意。

差不多10年前，人工智能、大数据等领域异军突起，花开遍地；4年前本书英文版正式出版，但并未掀起太大波澜。笔者当时偶然发现此书时，感觉调制样式分类领域若能与人工智能、大数据等领域融合，有望催生出认知电子侦察、认知信号情报、认知MIMO通信等新型领域，并开始着手翻译。然而，阴差阳错，直到4年后才终可付梓，调制样式分类领域未能赶上人工智能、大数据的“花季”，而目前有关将这几个领域进行融合的研究也已取得了可喜的进展。

每思及此，颇有“落花时节方逢君”之憾。但正所谓“失之东隅，收之桑榆”，花无早晚，能开就好。

译者
2019年于嘉兴

前 言

自动调制样式分类指的是识别所接收信号的调制样式,以确保可以正确地解调该信号,进而能够准确地恢复所发送的信息。该技术在军事、商业、情报、安全等领域内均有广泛应用。

模拟调制(如 AM、FM)和数字调制(如 PSK、QAM)的主要功能是利用载波信号将较低频率的基带信号转换为较高频率的带通调制信号,以提升信号的抗噪能力并扩展信号的传输距离。不同的调制样式需要不同的硬件配置、分配不同的带宽,其在不同传输信道中所能实现的抗噪能力、数据速率、鲁棒性也不尽相同。为解调已调信号并恢复出其中所含的信息,系统接收端必须首先知道调制的类型。

在军事领域,调制样式可以视作一种加密,使得事先不知道调制样式的接收机无法恢复出信号中所含的信息。换言之,若想恢复出所截获通信信号(可能是来自敌方的信号)中所含的信息,则需要一个调制样式分类器来确定发射机所采用的调制样式。除可为恢复出信号中所含信息奠定基础外,调制样式分类还可用于识别辐射源并生成与调制样式相匹配的干扰信号。最初调制样式分类过程都是由有经验的信号工程师人工完成的,后来则利用自动调制样式分类系统实现了自动化,自动化方式扩展了可识别的调制样式的种类,并提升了总体识别性能。

与早期通信系统不同,现代民用领域的信号发射机采用多种调制样式以控制数据速率、带宽利用率,并确保所传信息的完整性。尽管发射端与接收端都知道调制样式池中所包含的调制样式,但具体调制样式的选择是自适应进行的,而接收端可能事先对此一无所知。因此,接收端需要利用自动调制样式分类机制来选出正确的解调方式,以确保成功恢复该消息。

本专著讨论了可用于通信信号自动调制样式分类的多种算法。前两章首先介绍了理论信号模型,为后续分析奠定原理基础。重要的一步是统一不同研究中提出的各种不同的信号模型,为分析不同自动调制样式分类算法建立通用框架。

本书涵盖了过去 20 年开发的主要的方法,并将相关算法系统性地分为 5 类:基于似然的分类器、基于分布检验的分类器、基于特征的分类器、机器学习辅助的分类器、盲调制样式分类器。对于每一种调制样式分类器,本书都列出了基本假设与系统需求,并利用数学表达式、图示、编程伪码等方式说明了设计实现过程。最后,还通过理论分析和数值仿真实验两种方式对各种自动调制样式分类器的性能进行了比较。部分算法的 MATLAB 源代码可从以下网址中得到:<https://code.google.com/p/amc-toolbox/>。

本书还利用在自动调制样式分类基本原理方面积累的知识,并根据各种自动调制样式分类算法不同的特点,提出了特定军用、民用领域内自动调制样式分类算法的具体实现过程。

由于自动调制样式分类领域还在不断发展,因此本书不可能是终极版或完备版。然而,

本书作者依然有如下希冀：研究生在研究性杂志上发表学术论文前，能够充分了解自动调制样式分类领域的基本知识；相关领域内的研究人员能够对该领域的总体发展状况有清晰的了解；当前正在研究该领域的研究人员和工程师可将本书用作参考书。

书中舛误难免，万望见谅，预致歉意。我们欢迎任何形式的评论或纠错，烦请发至 a.k.nandi@ieee.org 或通过其他渠道告知。

Zhechen Zhu, Asoke K. Nandi
英国，伦敦

缩 略 语 表

AD	安德森-达令
ALRT	平均似然比检验
AM	调幅
AMC	自动调制样式分类
AM&C	自适应调制与编码
ANN	人工神经网络
ASK	幅移键控
AWGN	加性高斯白噪声
BMC	盲调制样式分类
BP	反向传播
BPL	电力线宽带
BPSK	二进制相移键控
CDF	累积分布函数
CDP	循环域文件
CSI	信道状态信息
CvM	克莱默-冯·米塞斯
CWT	连续小波变换
DFT	离散傅里叶变换
DLRT	离散似然比检验
DSB	双边带调制
DSSS	直接序列扩频
EA	电子攻击
ECDF	经验累积分布函数
ECM	期望值/状态最大化
EM	期望值最大化
EP	电子防护
ES	电子支援
EW	电子战
FB	基于特征的
FHSS	跳频扩频
FM	调频
FSK	频移键控

GA	遗传算法
GLRT	广义似然比检验
GMM	混合高斯模型
GoF	拟合优度
GP	遗传规划
HLRT	混合似然比检验
HoS	高阶统计
ICA	独立成分分析
I-Q	同相与正交
KNN	k 最近邻
KS	科尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫
LA	链路自适应
LB	基于似然
LF	似然函数
LPD	低检测概率
LSB	下边带调制
LUT	查表
MAP	最大后验概率
MDLF	最小距离似然函数
MIMO	多输入多输出
ML	最大似然
MLP	多层感知
MSE	均方差
M-ASK	多进制幅移键控调制
M-FSK	多进制频移键控调制
M-PAM	多进制脉冲幅度调制
M-PSK	多进制相移键控调制
M-QAM	多进制正交幅度调制
ML-M	基于幅度的最大似然分类器
ML-P	基于相位的最大似然分类器
NPLF	非参数似然函数
ODST	优化的分布采样校验
PAM	脉冲幅度调制
PD	相位差
PDF	概率密度函数
PM	调相
PSK	相移键控调制
QAM	正交幅度调制

QPSK	正交相移键控调制
SC	谱相关性
SCF	谱相关函数
SISO	单输入单输出
SM	空分复用
SNR	信噪比
SSB	单边带调制
STC	时空编码
SVM	支持向量机
S α S	对称 α 稳定
USB	上边带调制
VSB	残留边带调制

符 号 表

A	调制符号表
H	信道矩阵
h	信道系数
I	同相分量
L	信号数量
N	样本数/信号长度
Q	正交分量
P_{cc}	分类准确度
r	接收信号
s	发射信号
W	带宽
w	权重
$\Im$	虚部
$\mathfrak{M}$	候选调制样式池
$\Re$	实部
Θ	信道参数集
Λ	似然比
σ^2	信号方差
ω	加性噪声
$\mathcal{H}$	假设模型
$\mathcal{L}$	似然
$\log \mathcal{L}$	对数似然函数
$\mathcal{M}$	调制样式
$\mathbb{F}$	调制样式分类特征
$\mathbb{F}$	调制样式分类特征集

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 背景	1
1.2 应用	2
1.2.1 军用	2
1.2.2 民用	3
1.3 领域综述与本书内容概览	4
1.4 调制样式与通信系统基础	5
1.4.1 模拟系统及其调制样式	5
1.4.2 数字系统及其调制样式	8
1.4.3 不同信道效应下的接收信号	12
1.5 小结	12
参考文献	12
第 2 章 调制样式分类信号模型	14
2.1 引言	14
2.2 加性高斯白噪声 (AWGN) 信道中的信号模型	15
2.2.1 I-Q 分量的信号分布	16
2.2.2 信号相位的信号分布	17
2.2.3 信号幅度的信号分布	18
2.3 衰落信道中的信号模型	18
2.4 非高斯噪声信道中的信号模型	20
2.4.1 米德尔顿 A 类模型	20
2.4.2 对称 α 稳定模型	21
2.4.3 混合高斯模型	21
2.5 小结	22
参考文献	23
第 3 章 基于似然的分类器	25
3.1 引言	25
3.2 最大似然分类器	25
3.2.1 加性高斯白噪声信道中的似然函数	25
3.2.2 衰落信道中的似然函数	27
3.2.3 非高斯噪声信道中的似然函数	28
3.2.4 最大似然分类决策	28

3.3	未知信道参数的似然比检验	29
3.3.1	平均似然比检验	29
3.3.2	广义似然比检验	30
3.3.3	混合似然比检验	31
3.4	降低复杂度	32
3.4.1	离散似然比检验与查找表	32
3.4.2	最小距离似然函数	32
3.4.3	非参数似然函数	33
3.5	小结	33
	参考文献	33
第4章	基于分布检验的分类器	35
4.1	引言	35
4.2	科尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫(KS)检验分类器	36
4.2.1	KS检验拟合优度	36
4.2.2	单样本KS检验分类器	37
4.2.3	双样本KS检验分类器	39
4.2.4	相位差分类器	39
4.3	克莱默-冯·米塞斯检验分类器	40
4.4	安德森-达令检验分类器	41
4.5	优化的分布采样检验分类器	41
4.5.1	采样位置优化	42
4.5.2	分布采样	43
4.5.3	分类决策标准	43
4.5.4	调制样式分类决策	44
4.6	小结	44
	参考文献	45
第5章	调制样式分类的特征	47
5.1	引言	47
5.2	基于信号频谱的特征	47
5.2.1	基于信号频谱的特征	48
5.2.2	基于频谱的具体特征	50
5.2.3	基于频谱特征决策	50
5.2.4	决策门限优化	51
5.3	基于小波变换的特征	52
5.4	基于高阶统计的特征	54
5.4.1	基于高阶矩的特征	54
5.4.2	基于高阶累积量的特征	55
5.5	基于循环平稳分析的特征	56

5.6 小结	57
参考文献	58
第6章 利用机器学习实现调制样式分类	60
6.1 引言	60
6.2 k 最近邻分类器	60
6.2.1 构建参考特征空间	60
6.2.2 明确距离定义	61
6.2.3 k 最近邻决策	61
6.3 支持向量机分类器	62
6.4 利用逻辑回归实现信号特征组合	63
6.5 利用人工神经网络实现信号特征组合	64
6.6 利用遗传算法实现信号特征选择	65
6.7 利用遗传编程实现信号特征选择与信号特征组合	66
6.7.1 树状结构解	67
6.7.2 遗传算子	68
6.7.3 适应度评价	69
6.8 小结	70
参考文献	70
第7章 盲调制样式分类	72
7.1 引言	72
7.2 利用基于似然的分类器实现期望最大化	72
7.2.1 期望值最大化评估器	73
7.2.2 最大似然分类器	75
7.2.3 最小似然距离分类器	75
7.3 最小距离质心估计与非参数似然分类器	76
7.3.1 最小距离质心估计	76
7.3.2 非参数似然函数	78
7.4 小结	79
参考文献	80
第8章 各种调制样式分类器的比较	82
8.1 简介	82
8.2 系统要求及适用的调制样式	82
8.3 加性噪声情况下的分类准确度	84
8.3.1 分类器评价标准	85
8.3.2 加性高斯白噪声信道中的性能比较	85
8.4 信号长度有限情况下的分类准确度	90
8.5 存在相位偏移时的分类鲁棒性	94

8.6 存在频率偏移时的分类鲁棒性	98
8.7 运算复杂度	102
8.8 小结	103
参考文献	103
第 9 章 民用调制样式分类	104
9.1 引言	104
9.2 对高阶调制样式的分类	104
9.3 链路自适应系统的调制样式分类	105
9.4 多输入多输出 (MIMO) 系统的调制样式分类	106
9.5 小结	110
参考文献	110
第 10 章 军用调制样式分类器设计	112
10.1 简介	112
10.2 调制样式池未知情况下的调制样式分类器设计	112
10.3 低检测概率信号调制样式分类器	114
10.3.1 直接序列扩谱信号的调制样式分类	115
10.3.2 FHSS 信号的调制样式分类	116
10.4 小结	117
参考文献	117

第1章 概述

1.1 背景

自动调制样式分类(AMC)最初应用于军事领域,在电子战、监视、威胁分析等领域要求对敌方信号的调制样式进行识别,以便区分敌方的发射设备、引导干扰、恢复所接收信号中的信息。所谓“自动”,是相对于最初的手动、人工调制样式分类这一传统模式而言的,这种传统模式下,信号通常由工程师来处理,信号侦察设备、信号处理设备等作为辅助。过去20年内开发的大多数调制样式分类器都通过电子处理器来实现。在20世纪80年代至90年代期间,大量从事信号处理、通信等领域研究的人员开始专注于研究自动调制样式分类这一领域。这期间产生的典型成果就是Azzouz和Nandi(1996)首次出版了这方面的专著,该专著的影响力非常大。从那时起,军用自动调制样式分类领域也开始引起关注。

进入21世纪以来,通信技术领域发生了翻天覆地的变化,其中有几种技术在提升各种通信系统的吞吐量方面起到了重要作用。链路自适应(LA)亦称自适应调制与编码(AM&C)技术,该技术可自适应选择一种调制样式,并将多种调制样式放在样式库中供同一通信系统选用(Goldsmith and Chua, 1998)。这种模式根据具体的信道状态来自适应选择调制样式,以实现传输可靠性、数据速率的最优化。当然,尽管发射机可以自由选择调制样式来发射信号,但接收机必须知道发射机所采用的调制样式来解调信号,这样才能保证信息传输的成功。要实现这一点,一种比较简单的方法就是所发射的每个信号帧中都包含调制样式信息,这样接收机就可以知道发射机的调制样式已经改变,并相应做出改变。然而,这种策略会影响频谱效率,因为每个信号帧都额外增加了调制样式信息。当前无线频谱极度有限、珍贵,这种策略无疑不够高效。基于上述原因,调制样式的自动分类成为了解决该问题的一种颇具吸引力的方案。得益于微处理器的发展,当前的接收机已经具备足够的运算能力,这使得用信号处理实现自动调制样式分类成为可能。通过自动识别所接收信号的调制样式,接收机无须事先知道发射机所采用的调制样式类别,且仍能成功实现解调。最终,频谱效率也可以提升,因为无须在发射信号帧中包含调制样式信息。总之,自动调制样式分类已成为包括认知无线电、软件定义无线电在内的智能化无线电系统不可分割的一部分。

过去数年内,出现了很多术语来描述本书所述的同一个问题,包括调制样式辨识(modulation recognition)、自动调制样式辨识(automatic modulation recognition)、调制样式识别(modulation identification)、调制样式分类(modulation classification)、自动调制样式分类(automatic modulation classification),等等。还有一些更加具体的术

语来描述该问题,例如 PSK 调制样式分类、M-QAM 分类等,这些术语只是更加具体应用场景下的描述而已,其基本原理仍是调制样式的分类。本书中,我们决定采用自动调制样式分类(AMC)这一术语来作为上述所有术语的统称。

1.2 应用

上文已经简单阐述了自动调制样式分类的可能应用场景,本节我们将更加详细地描述军用和民用领域的具体情况。

1.2.1 军用

在很多军事应用中,自动调制样式分类发挥着基础性的作用。现代电子战(EW)的主要功能分3类,即电子支援(ES)、电子攻击(EA)和电子防护(EP)(Poisel, 2008)。其中,电子支援旨在从射频辐射信号中收集信息,因此,在成功检测到信号之后往往要进行自动调制样式分类,而分类结果则可用于电子战的所有环节中。图1.1所示为调制样式分类器如何用于电子战系统。

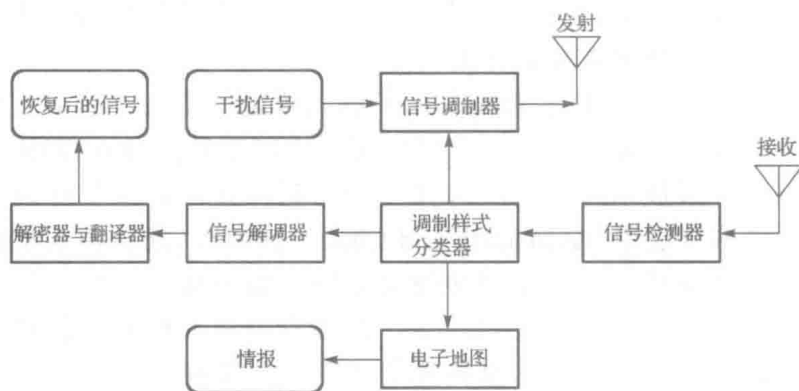


图 1.1 军用信号情报系统

对于电子支援环节而言,调制样式分类信息可用于解调所接收的敌方发射的信号,以便最终恢复出其中的信息。当然,这需要在信号解密器与翻译器的帮助下才能完成。同时,信号调制样式分类信息本身也可以为电子地图系统提供关键信息,可用于确定敌方部队及其可能的地理位置。

电子攻击环节主要采用干扰等手段来阻止敌方部队之间的通信。尽管干扰方法有很多种,但最常用的方法是利用与敌方相同的调制样式、在敌方通信信道上发射噪声信号或专门设计的信号。为压制敌方通信,干扰信号的工作频段必须与敌方相同,而获取敌方工作频段的工作主要由信号检测器来完成。此外,干扰信号的功率也要足够高,这主要由放大器来实现,即在干扰信号发射之前先对其进行功率放大。更重要的是,所发射信号的调制样式必须与调制样式分类器所检测出的调制样式相同。

电子防护环节的主要目标是保护己方通信免遭敌方电子攻击系统的攻击。如上所