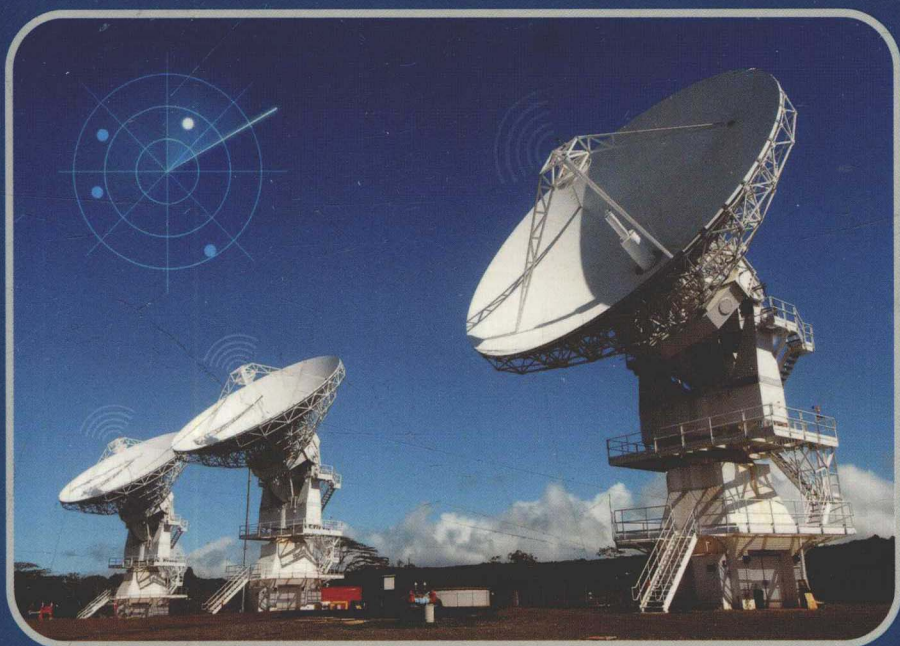




装备科技译著出版基金

IET



现代雷达检测理论

Modern Radar Detection Theory

[意] 安东尼奥·德梅奥 (Antonio De Maio)

编

[意] 玛莉亚·萨布丽娜格列柯 (Maria Sabrina Grec)

胡来招 白华 杨曼 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

现代雷达检测理论

Modern Radar Detection Theory

[意] 安东尼奥·德梅奥

编

[意] 玛莉亚·萨布丽娜格列柯

胡来招 白华 杨曼 译



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书讨论了在雷达检测方面新出现的前沿研究。本书要点包括:谱特性未知的高斯干扰下的自适应雷达检测;用恒定性理论作为工具使设计具有恒虚警率特征;一级和二级检测器及其性能;只可获得一小部分训练数据用于谱估计的工作场景;利用协方差矩阵中先验知识的贝叶斯雷达检测;非高斯干扰下的雷达检测。本书充分阐述了基于各种准则的检测器设计技术以及恒虚警率问题,分析了实际应用中机载、地面和舰载雷达的性能,并讨论了基于真实雷达数据的结论。

本书为致力于研究统计学信号处理及其在雷达系统中应用的研究人员、高等学者和工程师提供关于自适应雷达检测最新发展的广泛参考。

著作权合同登记 图字:军-2016-075号

图书在版编目(CIP)数据

现代雷达检测理论/(意)安东尼奥·德梅奥
(Antonio De Maio), (意)玛莉亚·萨布丽娜格列柯
(Maria Sabrina Grec)编;胡来招,白华,杨曼译. —
北京:国防工业出版社,2018.12
书名原文:Modern Radar Detection Theory
ISBN 978-7-118-11758-5

I. ①现... II. ①安... ②玛... ③胡... ④白... ⑤杨
... III. ①雷达目标-目标检测 IV. TN951
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 287033 号

Original English Language Edition Published by The IET, Copyright 2015. All Rights Reserved.

※

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 100048)
天津嘉恒印务有限公司印刷
新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 19¼ 字数 366 千字
2018 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 136.00 元

(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

信号检测几乎在所有的无线电应用中都是很基本的内容,尤其在雷达应用中。把这个问题处理为一个二态假设的检验问题,把背景的随机性充分考虑了进去,可以说是革命性的一步。之后,随着研究的深入,人们期待从杂波和干扰中提取有效目标信号的要求更加明确,加上微电子技术的发展推动了信号处理能力的增强,研究结果又上了一个台阶,明确地从把信号看成一个标量升级到把信号看成是在更高维空间内的一个矢量。其实,直观的感觉是明显的,如果我们想分离不同的信号状态,信号空间的维度越高,成功率可能就越高。因此,用矢量来着手分析,成为信号检测的一个基础。

从雷达信号检测一开始,恒虚警就被当成一个重要的准则,它在检测中具有非常关键的作用。尽管难以证明恒虚警可以满足检测想要达到的优异性能,或者恒虚警是满足一定虚警概率下的检测概率最大的一个办法,但是,它还是提纲式地给了我们一个明确的依据,成为所有自适应问题的一个根基或参考。当然,或许人们也会对此提出更深的疑问,从恒虚警出发,能够把我们引向好的检测特性吗?

本书由多位作者合著,系统地论述了现代雷达检测的理论。译者几年前看到本书,就有一种冲动,觉得应当翻译出来,供业内参考。尽管公式描述多了一点,专业名词也很多,阅读不一定那么方便,但是译者依然认为还是值得一读。经过了一年的努力,全书的译稿终于形成,但愿译者对书中所论述问题的理解不足不会成为翻译的缺陷,妨碍读者的阅读。译者还是认为,本书不但值得雷达界的工程技术人员阅读思考,也值得从事电子对抗的工程技术人员认真阅读,也可作为信号截获领域的其他研究人员和研究生的重要参考。无论如何,本书的缺点就是不好读,译者恳切地期待国内的作者们,能不能写一本深入浅出、更好阅读的专著,把信号检测问题重新阐述一番。从这个意义上说,祝这本书成为抛砖引玉的那块砖!

译者

目 录

第1章 雷达检测引论	1
1.1 历史背景和术语	1
1.2 符号	5
1.3 检测理论	7
1.3.1 信号和干扰模型	7
1.3.2 基本概念	9
1.3.3 检测器的设计准则	10
1.3.4 检测理论中的恒虚警(CFAR)特性和不变性	13
1.4 本书的结构、使用和概要	14
1.5 参考	16
参考文献	17
第2章 高斯白噪声下的雷达检测:GLRT 框架	19
2.1 引言	19
2.2 问题的表述	20
2.3 充分性的减缩	21
2.4 最优 NP 检测器和 UMP 检测器的存在	23
2.4.1 相干的情况	23
2.4.2 非相干的情况	24
2.5 GLRT 设计	25
2.6 性能分析	28
2.6.1 相干的情况	29
2.6.2 非相干的情况	32
2.7 结论和深入阅读	36
参考文献	36
第3章 自适应雷达的子空间检测:检测器及性能分析	38
3.1 引言	38
3.2 干扰和噪声条件下的信号检测	40
3.2.1 在色高斯噪声中检测已知信号	41

3.2.2 零均色高斯噪声中检测相位未知的已知信号	42
3.3 子空间信号模型和不变性假设检测	43
3.3.1 子空间信号模型	44
3.3.2 子空间信号模型的机理	44
3.3.3 假设检验	46
3.3.4 干扰噪声环境下子空间信号检测的最大不变量	48
3.4 检测概率和虚警概率的解析表达	49
3.4.1 子空间 GLRT 的 P_d 和 P_{fa}	49
3.4.2 子空间 AMF 检验的 P_d 和 P_{fa}	50
3.4.3 子空间 ACE 检验的 P_d 和 P_{fa}	51
3.5 自适应子空间检测器的性能结果	52
3.6 小结	61
附录 3A	62
A.1 GLRT 的子空间模式	62
A.2 AMF 检验的子空间模式	63
A.3 ACE 检验的子空间模式	64
附录 3B	65
附录 3C	67
最大不变统计量的分布	69
附录 3D	71
参考文献	72
第 4 章 谱特性未知的高斯干扰下点状目标的两级检测器	76
4.1 引言:设计原则	76
4.2 两级架构的描述、性能分析和比较	81
4.2.1 自适应旁瓣消隐器	84
4.2.2 提高 ASB 的鲁棒性:基于子空间的自适应旁瓣切除	88
4.2.3 提高 ASB 选择性的改进方法	93
4.2.4 提高 ASB 选择性或鲁棒性的改进方法	104
4.2.5 选择性两级检测器	111
4.3 小结	114
参考文献	115
第 5 章 干扰中的贝叶斯雷达检测	118
5.1 引言	118
5.2 通用 STAP 信号模型	118
5.3 KA-STAP 模型	121

5.3.1	知识辅助均匀模型	121
5.3.2	贝叶斯 GLRT(B-GLRT) 与贝叶斯 AMF(B-AMF)	122
5.3.3	超参数的选择	125
5.3.4	扩展到部分均匀和复合高斯的模型	128
5.4	知识辅助两层 STAP 模型	131
5.5	借助知识的含参 STAP 模型	135
5.6	小结	143
附录 5A	式(5.35)的 KA-ACE 的推导	143
附录 5B	借助知识的复合高斯模型中的贝叶斯检测器的推导	144
	参考文献	146
第 6 章	高斯训练条件下样本欠缺的自适应雷达检测	148
6.1	引言	148
6.2	利用预期似然选择的加载改善自适应检测	151
6.2.1	由二次数据形成的单个自适应滤波器以及使用一次数据的自适应门限	151
6.2.2	使用二次数据的复合自适应滤波和检测对各测试单元进行的各种自适应处理	153
6.2.3	观察	192
6.3	利用协方差矩阵架构改善自适应检测	196
6.3.1	背景: Hermitian 协方差矩阵的 TVAR(m) 近似, 最大似然模型和阶数估计 ^[56,57]	199
6.3.2	基于 TVAR(m) 的自适应滤波器和自适应检测器在 TVAR(m) 或 AR(m) 干扰下的性能分析	202
6.3.3	基于 TVAR(m) 的自适应检测器在 TVAR(m) 或 AR(m) 干扰下的结果的仿真	207
6.3.4	观察	221
6.4	利用数据划分改善自适应检测	224
6.4.1	“一步”自适应恒虚警检测器性能对比“两步”自适应处理的分析	226
6.4.2	检测性能分析的比较	231
6.4.3	观察	239
	参考文献	241
第 7 章	复合高斯模型和目标检测: 统一的视图	246
7.1	引言	246
7.2	单变强度的复合指数模型	247

7.2.1	强尾部分布和完全单调的函数	247
7.2.2	例子	248
7.3	数量波动准则	249
7.3.1	转移理论和 CLT	249
7.3.2	数量波动的模型	252
7.4	复数复合高斯的随机矢量	252
7.5	在复数复合高斯杂波条件下的最佳信号检测	255
7.5.1	似然比和与数据关联的门限的解释	256
7.5.2	似然比和与估计器-相关器的解释	257
7.6	在复数复合高斯杂波条件下的次佳检测	258
7.6.1	似然比的次佳近似	258
7.6.2	与数据关联的门限的次佳近似	259
7.6.3	估计器-相关器的次佳近似	261
7.6.4	最佳和次佳检测器的性能评估	262
7.7	最佳检测器的新解释	264
7.7.1	估计器公式的乘积	264
7.7.2	估计器乘积的一般性质	265
附录 7. A	转移理论和它的解释	272
参考文献		273

第 8 章 球不变随机矢量和椭圆过程中的协方差矩阵估计及其在雷达检测中的应用

8.1	背景和问题的陈述	276
8.1.1	高斯情况下的背景参数估计	277
8.1.2	高斯情况下的最佳检测	278
8.2	非高斯环境模型	280
8.2.1	复椭圆对称分布	281
8.2.2	球不变随机矢量的子类	282
8.3	复椭圆对称分布噪声条件下的协方差矩阵估计	283
8.3.1	M 估计器	283
8.3.2	M 估计器的性能	284
8.3.3	M 估计器的渐近分布	285
8.3.4	在球不变随机矢量框架中与 M 估计器的关系	288
8.4	复椭圆对称分布噪声条件下的最佳检测	291
8.5	广义对称架构的协方差矩阵估计	293
8.5.1	圆高斯噪声下的检测	294

8.5.2 非高斯噪声下的检测	295
8.6 在雷达中的应用	298
8.6.1 地基雷达的检测	298
8.6.2 预警雷达的检测	299
8.6.3 STAP 检测	300
8.6.4 定点估计的鲁棒性	302
8.7 小结	304
参考文献	304

第 1 章 雷达检测引论

Antonio De Maio, Maria S. Greco, Danilo Orlando

1.1 历史背景和术语

雷达是无线电探测和测距的缩写。就如同这个术语所表示的,这类装置是用来检测目标的存在并测量其距离的^[1]。雷达系统的基本工作原理从物理学家麦克斯韦(JC. Maxwell)和赫兹(H. Hertz)的年代开始就广为人知。它依赖于这样一个事实:电磁波遇到物体,部分能量被这个目标截获,并向各个方向散射。结果,回到辐射源的能量可以被用来指示物体的存在和距离^[2]。

在麦克斯韦关于电磁场的原始研究中,他就认识到了上述机理,到了 19 世纪末,赫兹做了一系列的实验,证明无线电波确实被金属物体所反射。到了 1920 年,无线电的著名先驱马可尼(SG. Marconi)清楚地认识到通过无线电波揭晓远处物体存在的可能性,他的论文描述了实验所使用的系统和实验结果,让我们清楚地看到了这一点。另外,他指出了在恶劣天气条件下(比如大雾)利用这样的系统保障航海。到了 1922 年,马可尼在无线电工程学会(现在的电子和电气工程师学会 IEEE 前身)的讲话中强烈地敦促这个技术的应用。无线电系统的另一个重要的先驱者是德国发明家赫尔斯迈耶(Hulsmener)。1903 年,他构建了第一个舰船防撞系统探测无线电回波,它由一个发射装置和一个分离的相关接收机构成,两者都使用了各自的偶极子天线。这个系统能够探测到 3km 处的船,但是却还不能给出任何距离信息。

雷达成为可运作的实际装置是在 20 世纪 20 年代到 30 年代初,特别是由于有军事应用的压力,因为第二次世界大战雷达的主要应用是在空中。在这个时期内起主要作用的各国,分别独立、秘密地开发了这样的系统。

在英国,利用无线电信号的第一批研究是由当时在气象局工作的罗伯特·亚历山大·沃特森·瓦特(Robert Alexander Watson-Watt)爵士开展的,他的研究涉及探测打雷时所发出的无线电信号并确定其位置。之后,他成为无线电研究站的负责人,进行军事方面的科学研究。当英国被卷入战争以后,英国科学界将他们的努力聚焦于像飞机这样可能具有威胁的目标所反射的无线电信号检测。

结果,沃特森·瓦特检测闪电的概念被用于形成基于脉冲的探测系统,可以给出对距离的测量。在战争进行期间,研究被进一步深入开展。

在美国,雷达系统被海军和陆军分别开发,但是也有一些合作。第一个系统的目标是基于观察发射信号的干涉来探测远处目标的存在。美国海军实验室(NRL)推出了一个简单的干涉波检测装置,用于检测舰船或飞机,但是还不能确定其距离和速度。而在英国,由于发明了脉冲雷达,则可以提供这样的信息。海军实验室的另一项重要的技术进步是双工器,它使发射机和接收机可以使用同一个天线。至于陆军,部队信号研究实验室对雷达系统的设计做出了重要贡献,也探讨了海军实验室所给出的结果。

如同在本节开头所提到的,在德国,赫尔斯迈耶是第一个用于遥测船只存在的无线电装置(1903年)的发明者。但是,这个装置不能被认为是雷达,因为它不提供任何距离信息。在其后的60年内,基于无线电的探测系统在德国猛增,但是其中没有真正的雷达。随着第二次世界大战的到来,设计基于无线电的探测系统的科学努力再次被加强。结果,像GEMA、德律风根(Telefunken)、罗伦兹(Lorenz)这样的工业部门开始了与德国军方的合作,目标就是实现真正的雷达系统,在探测及定位飞机与舰船方面具有优秀的性能。

意大利开发的第一个基于无线电的探测系统叫做无线电探测仪,是马可尼在1933年左右开发的。到1935年5月,马可尼向法西斯的独裁者墨索里尼和军方总参谋部的成员们演示了他的系统,但是其输出功率还不足以实现军事应用。虽然马可尼的演示系统提升了大家的兴趣,但是却并没有多少装备。结果,这个基于无线电技术的开发由墨索里尼交给了1916年在里窝那的意大利海军学会成立的电子通信研究院(RIEC)。RIEC的物理和无线电技术导师蒂伯里奥(Ugo Tiberio)中尉被任命为这个项目的兼职领头人。蒂伯里奥准备了一个开发无线电探测装置(RDT)的实验装置的报告。到1936年底,蒂伯里奥和卡拉拉(Nello Carrara)演示了意大利的第一个无线电探测装置EC-1,后者是RIEC的民用物理学导师,负责开发该装置的发射机。同其他国家中的装置一样,EC-1并不提供距离测量,为了增加这个能力,1937年启动了脉冲系统的开发。最后,1941年开发的进化版EC-3(GUFO)可以被看成第一个可实际应用的意大利雷达系统。

在德国,GEMA制造的FREYA雷达用于构建防空预警雷达网系统^[3]。这些雷达使用工作在120~130MHz附近频率上的天线阵,并在第二次世界大战的初期使用。在战争的进程中,基于这种雷达开发了的很多型号。德国的地基战斗机控制雷达叫乌兹堡(Würzburg),后来发展为乌兹堡-里斯(Würzburg-Riese),其工作频率大约为560MHz。整个德国防空系统是一个雷达站组成的网,它的每一个站点都用代码命名。站点有3个层次。特别是,第三层要用编

码的无线电向第一层发送信息,第二层生成天空的图形,并把它发送给第一层。最后,第一层融合从其他层获取的信息(以及它自己的信息),然后把组合好的信息发送给最顶层的作战室,在那里把整个图形装配起来,再发回给各层。

对德国防空系统的谍报信息迫使盟军的科学家们开发干扰和欺骗技术。最早的干扰机之一是噪声阻塞干扰机(MANDREL),是由英国科学家开发的,用于对付弗雷亚及其衍生型号。作为响应,德国扩展了FREYA工作的频带,于是MANDREL的频率覆盖也必须随之增加。之后,德国科学家搞清楚了英国的“链家”防空系统,这个系统是一个由英国在战前和战争期间建立的海岸预警雷达构成的环。“链家”的站点被设计成工作在 $20 \sim 50\text{MHz}$ 的频率上(尽管典型的工作频率是 $20 \sim 30\text{MHz}$)。具有多个工作频率提供了抵御干扰的某种保护。典型的探测距离是 190km 。“链家”实现了装备不受制于盟军各种干扰的预警雷达要求,引出了完全无源雷达接收机概念。最后,德律风根公司开发了世界上第一个双基地雷达,它的名字叫 Klein Heidelberg。这个双基地雷达架构的优点是多方面的。更确切地讲,它可以隐蔽地工作,以对付辐射源定位、干扰机和搜寻辐射的反辐射导弹,具有很远的作用距离,成本、体积、重量、功耗都比同水平的单基地雷达小。随后,人们又研究了双基地雷达架构后面的概念^[4],给出了现代多基地的架构,涉及多个实体辐射信号、接收回波。同样,只要接收机的位置离开发射机,就能够保持隐蔽。

观察这些年来雷达系统演化的进程,很明显,从第二次世界大战之后直到今天,雷达的性能和应用都在迅速发展,而且可以预期还会进一步提升。雷达应用的主要领域包括:

- 军事领域(防空系统、进攻性导弹和其他武器);
- 环境遥感(气象观察、行星观察、海洋冰层映射以便有效地给船只导航);
- 航空管制;
- 高速公路安全(测速和防撞系统);
- 舰船安全等。

尽管有上述大量不同的应用,雷达具有三个基本功能,即搜索、跟踪和成像^[5]。搜索雷达最重要的工作是针对目标检测的处理,而跟踪雷达的主要目的是对目标进行距离、方位角、俯仰角和多普勒频偏的测量,并达到预定的精准度。但是,这样的说法并不排斥搜索雷达也可以用于其他传感器的测量,或者跟踪雷达也要实施检测过程。在很多现有的跟踪系统中,跟踪功能是由一系列模拟电路完成的,它们控制天线和距离的伺服,以便不断地把天线波束指向目标位置。在现代系统中,跟踪功能是由处理传感器对目标的一系列测量完成的。跟踪算法通常由软件完成,给出目标准确的状态矢量(位置、速度和加速度)。这样的

状态估计成为火控系统要集成的一部分,把武器或另一个传感器引导到这个目标状态上去。一旦目标被跟踪,就可以实施成像功能,以便对目标进行分类、鉴别、识别。实际上,它会给出高分辨力的距离、方位、俯仰和某些多普勒数据。一般来说,成像雷达试图把电磁散射系数映射到一个二维平面内来获取对目标的图像。给具有较高反射系数的对象以较高的光学亮度,就会构成一个光学图像。成像雷达的典型例子是用合成孔径雷达(SAR)^[6]。合成孔径雷达把雷达硬件、波形、信号处理和相关的运动综合在一起,创造出了包含静态目标和感兴趣背景的照片般的结果。任何一个合成孔径雷达的基本产出就是一个被照亮的场景的高分辨力的二维强度图像。合成孔径雷达在遥感领域被广泛使用,用于地图测绘和地面普查,也用于军事领域,对固定目标进行检测、定位、识别和评估。

本书的焦点是雷达检测的现代处理技术。在这方面,雷达系统的效能是以它从杂波或/和其他干扰中区分出目标的能力来度量的。为了改善在实际场景中的检测能力,雷达系统通常处理其天线波束指向目标时的多个脉冲。在这种情况下,发射 N 个脉冲进行检测所花费的时间称为驻留时间(参看第2章)。如果这些脉冲被相参积累(在处理过程中使用所接收到的信号的幅度和相位,使得信号的贡献可以彼此同相叠加),处理的时间间隔通常就称为相参积累间隔。

另外,“杂波”这个词是指不需要(由于环境产生)的回波,它会干扰或阻塞目标信号。存在几类杂波,它们在谱特性上有差异。比如,杂波可能是由地球(地面或海面)、战略上不感兴趣的其他目标、箔条、云雨、鸟虫等引起的。其中很重要的一类杂波叫地杂波^[7],是由地面背景造成的,它在海滨环境中是很有害的^[8]。对所有雷达非杂波类的干扰源是来自远离雷达的电磁辐射源的刻意(干扰机)或非刻意的干扰,它们在雷达辐射/接收频率范围内辐射信号。这些有害的能量可以是由敌方的源造成的(第二次世界大战中就见到),也可能是由其他用途的设备所辐射的(比如远程通信系统),只要它们对雷达具有类同的干扰效果。杂波和干扰(不论来源)的抑制问题从一开始就在雷达设计师的心中占有重要位置。

时空自适应处理(STAP)和相关的技术对于在雷达中抑制杂波和干扰具有基础性的作用。第一个时空处理是由雷特(Reed)、马莱特(Mallett)、布兰南(Brennan)在文献[9,10]中提出的(RMB测试),是一个匹配滤波器后面跟着一个包络检波器。它需要知道扰动的协方差矩阵,在实际中,这个协方差矩阵是未知的,必须通过观察来估计。通常会假定,可以得到一系列的代表测量单元内噪声的二次数据,且下面要讨论的场景被认为是各向均匀的环境。为了确保恒定的虚警概率(CFAR)特性,RMB测试会用输出功率进行归一,对应的检测器就称为自适应匹配滤波器^[11]。在文献[12]中,使用GLRT测试来获取自适应的判决,可以在存在具有未知谱特性的高斯扰动条件下给出对相参脉冲串的检测。

Kelly的上述研究代表了雷达自适应检测的一个里程碑,大部分更近发表的论文都是按照这个思路给出的。实际上,实践中遇到的问题引出了在文献[12]中所提出的多种模型。比如,目标回波实际到达方向的不确定性导致了信号模型中子空间概念的应用(见第3章和第4章),由此引发了可调谐接收机的设计(见第4章)。还有最近的研究利用先验知识适当地选择用于估计的数据,从而改善STAP系统的检测性能(见第5章)。在公开文献中可以找到更多二次数据欠缺情况下的研究(见第6章)。雷达应用中的扰动模型是雷达研究领域关注的另一个问题。实际上,由于现代雷达分辨力的增加,高斯模型显得不合适了。为了应对这个问题,研究了复合高斯模型和更一般性的复椭圆对称(CES)分布(见第7章和第8章)。由于雷达分辨力的增加产生了所谓距离分布的目标,它们需要在雷达检测器的设计阶段添加额外的假设(见第9章),注意到这一点也是很重要的。

这样,我们就给出了用于设计判决架构的检测理论和统计工具的一个综述。

1.2 符 号

本书使用下列符号:

$\mathcal{R}$	实数集合
$\mathcal{C}$	复数集合
$\mathcal{N}$	自然数集合
$\mathbf{R}^{m \times n}$	维度为 $m \times n$ 的实矩阵
H	希尔伯特空间的标记
j	虚数的单位
$()^T$	矩阵的转置
$()^\dagger$	矩阵的希尔伯特算子
$()^*$	矩阵的共扼转置
$\mathbf{x}$	表示矢量
$\mathbf{X}$	表示矩阵
x	表示标量
x_i 或 $x(i)$	表示矢量 $\mathbf{x}$ 的第 i 个分量
$\mathbf{X}(n)$	表示比如矩阵 $\mathbf{X}$ 与时间 n 对应的量值,类似地可以有其他函数或变量
$\nabla f(\mathbf{x})$	表示函数的梯度,也可写成 $\frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}$, $\mathbf{x}$ 可为矢量 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$

$X(i,j)$ 或 X_{ij}	矩阵 X 的第 i,j 个元素
$X_{ij}(n)$	对应时间 n 的矩阵 X 的第 i,j 个元素
$E()$	数学期望
$\hat{x}$	矢量 x 的估计
$x \perp y$	矢量正交
$ x $	数的绝对值或模
$\ x\ $ 或 $\ x\ _2$	欧氏模(欧几里得范数)
$\ A\ _F$	弗氏模(Frobenius 范数)
$\ x\ _p$	模 l_p (p 范数)
$\text{Re}(z)$	复数的实部
$\text{Im}(z)$	复数的虚部
I_n 或 I	$n \times n$ 维单位矩阵
$0_{n,m}$ 或 0	$n \times m$ 维零矩阵
$\text{vec}(A)$	把 A 的列累起来的列矢量
$\text{diag}(A)$	A 的对角线元素构成的列矢量
$\text{rank}(A)$	矩阵 A 的秩
$A \otimes B$	两个矩阵的叉积
$\det()$	矩阵的行列式值
$\text{Tr}()$	矩阵的迹
$\lambda_i, i=1,2,\dots,m$	$m \times m$ 维矩阵的特征值
$R(A)$	A 的值域空间
$N(A)$	A 的零空间
$P()$	离散事件的概率
$p()$ 或 $f()$	随机变量的概率密度函数
σ^2 或 σ_x^2	随机变量 x 的方差
$\lg(a)$	a 以 10 为底的对数
$\ln(a)$	a 的自然对数
$\exp(a)$	指数函数
$A > B$	$A - B$ 为正定
$A \geq B$	$A - B$ 为半正定
矩阵 A 为	

$$A = \begin{bmatrix} A(1,1) & A(1,2) & \cdots & A(1,m) \\ A(2,1) & A(2,2) & \cdots & A(2,m) \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ A(m,1) & A(m,2) & \cdots & A(m,m) \end{bmatrix}$$

$$\text{矢量 } \mathbf{x} \text{ 为 } \mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_m]^T = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix}$$

1.3 检测理论

雷达系统面临从背景干扰中鉴别出有用目标回波的问题,这些背景干扰会隐藏目标而使检测变得困难。于是,雷达处理的使命就是确定所接收到的回波中是否有有用的信号分量,这个问题可以被两态模型的假设检测^[13]:

$$\begin{cases} H_0: \text{数据仅为干扰} \\ H_1: \text{数据含有干扰和目标信号} \end{cases} \quad (1.1)$$

式中, H_0 为空假设;而 H_1 为有假设(在雷达术语中,也分别称为只有噪声的假设和噪声加信号的假设)。

1.3.1 信号和干扰模型

关注目标的响应,并且注意到,根据工作的场景、特定的应用、距离分辨力、发射的波形等一般不确定的因素,可能会有几种模型。目标物理尺寸与距离分辨力的比确定了存在目标的距离单元的数量。确切地讲,当上述比值小于1时,目标响应是由一个在确定的距离单元内的类似于点的散射体产生的。当这个比值大于1时,可以给出适当的目标模型来观察有用的回波,它们会来自几个相邻的距离单元,也就是说,目标会占据多个距离单元(距离分布的目标)^[14]。从理论上讲,如果用 $\mathbf{Z}$ 表示接收到的回波矩阵,可以考虑下面两种情况:

$$\begin{cases} \mathbf{Z} \in \mathcal{C}^{N \times 1}, & \text{点状目标} \\ \mathbf{Z} \in \mathcal{C}^{N \times K_p}, K_p \in N \setminus \{1\}, & \text{距离分布目标} \end{cases} \quad (1.2)$$

式中,“ $\setminus$ ”表示不包含; K_p 为含有目标回波的距离单元的数量; N 为数据矢量的维度。

另外,强调一下后者的参数取决于组成系统、用于感知要侦察的区域的传感器数量 N_a 和所发射的脉冲数量 N_p ,这一点很重要。调整这两个量会影响目标导向方向矢量 $\mathbf{p}$,使其大小成为 $N = N_a \times K_p$ ^[7,8]。根据 (N_a, K_p) 的值,这个指向矢量在 $N_a > 1$ 且 $K_p > 1$ 时称为空时矢量,在 $N_a = 1$ 而 $K_p > 1$ 时称为时间矢量,在 $N_a > 1$ 但 $K_p = 1$ 时称为空间矢量。

在现实情况下,系统从目标返回的信号指向可能会与常规的指向矢量有所

不同,这是由于环境或设备因素造成的。结果是,认为这个指向矢量是完全确知的而设计的接收机的性能实际上会变差一点。克服这个问题的办法是采用子空间检测模态^[13,15],它的目标模型是若干已知的基矢量的组合。换句话说,假定指向矢量在已知的观察子空间内,就可能在存在指向失配时捕获目标的能量。于是在设计阶段,目标的方向矢量可以模型化为

$$p = H\theta \quad (1.3)$$

式中, $H \in \mathbb{C}^{N \times r}$ 为已知的满列秩矩阵,表示目标子空间; $\theta \in \mathbb{C}^{r \times 1}$ 表示未知的矢量,包含形成指向矢量的一些未知的系数。当然还有考虑指向失配的一些其他方法^[16]。

在设计阶段需要考虑的另一个重要因素是目标的反射性。这里,要引入一个系数 $\alpha \in \mathbb{C}$ 来模拟特定距离上信号的回波,它可以用几种解析的方法来描述。尤其是,我们用 A 和 φ 分别表示 α 的幅度和相位,可以看下面这些例子:

- (1) A 和 φ 为已知参数;
- (2) A 和 φ 为未知的确定型参数;
- (3) A 是未知的确定型参数, φ 是在 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布的随机变量;
- (4) A 是由某个已知的概率密度分布函数(PDF)约束的随机变量(或在已知的概率分布函数族内的某个参数未知的函数), φ 是在 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布的随机变量,且与 A 独立。

在实践中把 A 和 φ 建模成已知的参数是不合理的,但是从理论的角度看,为了做下列事却是有意义的:

- 确定最好的(MP)检测,它将给出任何其他测试可获得的性能的上限;
- 确定是否存在相对于 A 和/或 φ 的一致最好(UMP)测试。

另外,还有另外一些考虑实际场景问题的模型。但是重要的一点是,强调把 φ 作为模型的因变量可以把在 H_1 假设下的最大似然函数估计问题变成一个有意思的问题。

在结束本小节以前,回顾一下由雷达天线所收集的信号一般是含有干扰分量的,包括接收机自身的电子扰动(热噪声)、环境的反射(杂波)、压制或欺骗的干扰信号。假定欺骗型的干扰信号仅仅存在于雷达的一个或几个距离单元内,而压制型的干扰信号普遍存在于所有的距离单元内。另外一点需要注意的是,杂波在距离上的跨度是注视角和雷达脉冲重复频率(PRF)的函数。比如,在低重频系统中,雷达不模糊的距离范围要比雷达的视距大,因此,在视距之外,距离门内存在的仅仅是干扰信号和噪声。

至于杂波的响应,复包络的幅度通常假定是瑞利分布的,而对应的正交分量是复合高斯型的。在假定杂波是由大量相近、彼此独立的元素散射叠加而成时,根据中心极限定理,所导致的结果是高斯的,因此这个假定是成立的。但是,实