

TN 959.7/108 1
清华大学学术专著

雷达自动检测 与恒虚警处理

何友 关键 彭应宁 陆大给 著

清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

清华大学学术专著

雷达自动检测 与恒虚警处理

何友 关键 彭应宁 陆大铨 著

清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

Abstract

This book is a monograph about automatic radar detection and constant false alarm rate (CFAR) processing methods. In this book, the international advances in this research field for more than twenty years and fruits of authors' research in recent several years are summarized. The book is composed of twelve chapters. The main contents are principles of automatic radar detection, mean-level type CFAR detectors, order-statistics type CFAR detectors, generalized order statistics CFAR detectors with automatic censoring technique, adaptive CFAR detectors, CFAR processing in Weibull and Log-normal envelope clutter, biparametric CFAR techniques, CFAR processing in Rice and K distributed clutter, nonparametric CFAR processing, CFAR processing in frequency domain and other CFAR methods, the last is a brief review, suggestion and prospect.

This book could be used by the scientific and technical staffs engaged in radar engineering, sonar technique, electronic engineering, signal and information processing etc. to read and consult, and can also serve as textbook of graduate students of the above professions.

前 言

在自然界中,无论在人造的机器或者生物体中,检测都是广泛存在的行为方式,它根据一定的准则做出事件是否存在的判决。由于环境的不稳定,准则的不精确,在此过程中事件并没有发生而被错误地判决为发生的概率,即虚警概率。

雷达是军事和民用领域中探测目标的主要工具。它的主要目的就是在存在干扰的背景中检测出有用目标,这些干扰包括接收机内部热噪声、地物、雨雪、海浪等杂波干扰和电子对抗措施(ECM)、人工有源和无源干扰以及与有用目标混杂在一起的邻近干扰目标和它的旁瓣等。在雷达自动检测系统中,通常是将自动检测和恒虚警(CFAR, constant false alarm rate)技术结合使用以保持变化的杂波环境中获得可预测的检测性能和恒定虚警率。

雷达自动检测和跟踪中的虚警问题是每个雷达系统研究和设计人员不可回避的重要问题之一。二十多年来,雷达自动检测与CFAR处理技术逐渐发展成为国际雷达信号处理界的一大热门研究领域和关键性课题。CFAR技术是雷达自动检测系统中控制虚警率的最重要手段,它在雷达自动检测过程中起着极其重要的作用。现在,CFAR研究已经出现了多个研究方向。根据模拟杂波背景所使用的杂波分布模型分为:瑞利分布、韦布尔分布、对数正态分布、K分布和莱斯分布模型中的CFAR研究;按照数据处理方式分为:参量和非参量CFAR技术;按处理所在的数域分为:时域和频域CFAR研究方法;根据数据的形式分为:标量和向量CFAR技术;根据信号的相关程度分为:相关和不相关信号及部分相关信号的CFAR方法。此外,还可分为单参数和多参数CFAR技术,单传感器和多传感器分布式CFAR技术,以及其它的一些研究方法。

对于涉足于该领域的雷达系统研究与设计人员,多年来一直渴望有一部全面、系统介绍自动检测重要准则和CFAR处理模型的专著。本书试图较全面、系统地向读者介绍当代雷达自动检测原理与CFAR处理技术的发展与最新研究成果,并重点介绍均值(ML)类CFAR检测器、有序统计量(OS)类CFAR检测器、具有自动筛选技术的广义有序统计量CFAR检测器、自适应CFAR检测器、韦布尔和对数正态杂波中的CFAR处理、两参数CFAR技术、莱斯和K分布杂波中的CFAR处理、非参量CFAR处理和频域中的CFAR处理方法等,同时研究它们在均匀杂波背景、多目标环境和杂波边缘环境这三种典型信号背景中的性能。在撰写过程中,我们尽可能地搜集了大量有关CFAR和自动检测理论的文献,并通过各章节的合理编排使读者对这些种类繁多的CFAR处理方法有一个比较清晰和系统的了解。

应当指出,无论是雷达自动检测理论还是CFAR处理技术,当前仍处于迅速发展阶段,由于篇幅的限制,本书不可能对这些发展作出统览无余的介绍。为此,我们在每章的最后都进行了归纳和总结,指出一些重要的新发展,并罗列了相应的参考文献,供读者进一步阅读和研究参考。

本书第一作者在德国不伦瑞克工业大学进修期间,在CFAR领域得到了H. Rohling教授开拓性的指导,他对本书的出版给予了极大的鼓励和支持,在此表示最衷心的感谢。

著名雷达专家郇能敬教授和北京航空航天大学毛士艺教授对本书提出了一些宝贵意见。烟台海军航空工程学院刘永硕士参加了本书的出版工作,并为本书绘制了图形,在此一并表示感谢。

何友 关键 彭应宁 陆大铨

1998年10月

于清华大学和烟台海军航空工程学院

绪 论

早期的雷达系统把所有接收到的信息直接送给视频显示器,杂波、噪声和目标回波的幅度变化被同时显示出来,目标的检测能力由操作手决定。为了从背景杂波和噪声中区分目标回波,操作手要定时监视显示器回波图象上的密度变化。尽管在国内很多系统中仍然使用这些原始数据(距离-方位和距离-多普勒频率)的显示方法,但是有些现代雷达系统已完成自动检测和跟踪。具有自动检测和跟踪能力的智能化的雷达是现代雷达的发展趋势。所谓自动检测是与视觉检测相对应的,自动检测过程的一个重要部分是恒定虚警率(CFAR, constant false alarm rate)处理,这是我们重点研究的内容。本书的目的是对现代自动检测和恒虚警处理提供一个严格的描述,并着重讨论自动检测准则和在自动检测、跟踪雷达系统中广泛采用并且有重要价值的恒虚警技术。

自动检测处理的目的是在感兴趣的辨识单元(特别是距离-角度-多普勒频率单元)中自动检测目标回波,没有操作手参与而自动地提供目标报告。自动检测手段给雷达系统提供了强大的数据处理能力,应用自动检测的系统可以同时跟踪多个目标,借助于数字脉冲多普勒方法,它可以与增强的自动跟踪能力一起提供自动距离和速度模糊辨识。这些系统在所选择的距离-角度-多普勒频率单元处,把数字匹配滤波器的输出与自动描述噪声背景杂波和干扰变化实时产生的阈值(也称为门限)进行比较,并获得具有恒定虚警率的自动目标检测。将这些采用阈值的测试结果存储起来,并送到显示器,这样显示的不是原始数据,而是来自于距离-角度-多普勒频率单元的已经成功地通过测试的检测标志。

在自动检测雷达系统中,恒虚警处理是一个提供检测阈值的数字信号处理算法。CFAR设计的目的是提供相对来说可以避免噪声背景杂波和干扰变化影响的检测阈值,并且当与到达的样本进行比较时,使目标检测具有恒定的虚警概率。当为了开发而构造一个自动检测雷达系统时,系统的许多特征参数(其中主要是直接影响检测性能的参数)要事先给定。通常在对于某一观测区间进行检测时,要一起给出最大检测距离与虚警概率(P_b)和检测概率(P_d)。目标的雷达截面积起伏、杂波、背景噪声或干扰机干扰的变化统计模型是在监视范围内由目标回波统计特性和环境条件确定,那么,雷达设计必须确定检测准则和没有确定的参数(例如:发射机峰值功率、波形、天线增益和最小的信噪比(SNR)、信杂比(SCR)或信干比(SIR)比值)。为了能在特定的最大距离探测特定的平均雷达截面积的目标,且具有特定的检测概率 P_d (当该目标位于特定最大距离内时)和虚警概率 P_b (当没有目标存在时),需要根据有关目标雷达截面积起伏、杂波、背景噪声或干扰机干扰的特定统计模型进行探测。就此而论,自动雷达检测的基本问题是确定检测准则,使它能在某种最优意义上提供对目标的自动检测。在预先给定的最大范围内和给定的已知系统参数条件下,并采用特定的平均雷达截面积及目标雷达截面积起伏、杂波、背景噪声或干扰机干扰的统计模型,使检测具有特定的系统 P_b 和 P_d 。

对于最优雷达接收问题,自本世纪40年代初开始,已由D. O. North^[1], S. O. Rice^[2],

J. I. Marcum^[3]和 P. Swerling^[4]完成了对它的严格分析。早期的工作集中在确知恒定的白色高斯噪声(接收机噪声)背景中对非起伏的或斯威林起伏目标的单脉冲或非相干(相干也称为相参)脉冲链的最优检测。

除单脉冲线性检测器外,对现代窄带雷达接收器来说,重要的检测策略是:多脉冲线性和平方律检测,以及双门限检测策略。

多脉冲线性和平方律检测器与单脉冲检测器类似。检测统计量都是由若干个单脉冲检测统计量的和形成。多脉冲线性检测统计量是每个脉冲形成的包络函数的直接和,平方律检测统计量是包络平方的直接和。对于在接收机(白色高斯的)噪声中,对具有小信号噪声比的非起伏或斯威林起伏窄带非相干脉冲链的检测,多脉冲平方律检测器已被证明是近似最优的贝叶斯或奈曼·皮尔逊检测器。另一方面,对在接收机噪声中检测具有大的信号噪声比的非起伏窄带非相干脉冲链,多脉冲线性检测器已被证明是近似最优的检测器。

对单脉冲检测,线性和平方律检测器具有相同的性能特征。并且,对多脉冲检测来说,在接收机噪声中检测非起伏或斯威林起伏目标,线性和平方律检测非常类似。对于在接收机噪声中检测非起伏目标,多脉冲线性和平方律检测器间的性能差别已被证明^[3,4]最多只有大约 0.2dB,并且,当 N 较小的时候,平方律检测器实际上只是比线性检测器稍差。由于处理平方值的困难,几乎总是以线性检测替代平方律检测。关于在确知恒定的白色高斯杂波、噪声环境中的多脉冲线性检测策略在第 1 章中讨论。在第 2 章中将延伸讨论能量未知的白色高斯杂波、噪声环境中基于 CFAR 方法的检测。

高速 AD 转换技术和微型计算机的迅速发展给现代雷达系统带来了强大的处理能力。匹配于相干脉冲链的数字滤波器可以容易地在几百、几千个距离单元处实时地处理几十、几百个频率单元。因此,相干脉冲链和数字脉冲多普勒处理已成为现代自动检测和跟踪雷达系统的重要特征。一个相干脉冲链可以被看成一个单脉冲,系统通过数字信号处理技术来与它匹配。因此,在任意距离—多普勒频率单元中,在接收机噪声中对一个单相干脉冲链的最优接收可以通过单脉冲线性检测来完成。也就是在每个距离—多普勒频率单元中由数字匹配滤波器的输出形成样本包络,并把包络与对应于 P_{th} 的系统阈值函数进行比较。

为了解决距离模糊和速度模糊,脉冲多普勒雷达系统需要在每个辨识角度发射具有不同脉冲重复频率的多个相干脉冲链。多脉冲线性检测通过在接收机噪声中观测一组相干脉冲链对非起伏或斯威林起伏目标提供一个近似最优的策略。但是,因为在一个辨识角度的所有相干处理间隔(CPI, coherent processing interval)内必须存储所有的距离—多普勒频率样本,故脉冲多普勒雷达系统线性检测的数据存储要求可能很大,而次优的双门限检测(即二元检测)策略通常也能在非瑞利包络干扰环境中提供较好的检测。因此线性检测通常在两个相干处理间隔之间不使用非相干积累,而应用双门限检测策略。第 1 章描述了在杂波、噪声能量确知恒定的白色高斯杂波、噪声环境中的双门限检测策略。对于在杂波、噪声能量未知的变化的白色高斯杂波、噪声环境中,通过恒虚警方法的检测在第 2 章中讨论。

对于在瑞利包络杂波、噪声环境中的检测,最经典的 CFAR 技术是在第 2 章中讨论的均值(ML)类 CFAR 检测器。线性或双门限 CFAR 检测器的(P_d, P_{fa}, SCR)曲线不同于

在确知恒定的瑞利包络杂波、噪声环境中检测的斯威林曲线。通常,对于在瑞利包络杂波、噪声中的检测,对不同的 CFAR 策略和参考单元数,两组斯威林曲线间的信噪比之差被称为 CFAR 损失。因为,对于任一给定的 P_{fa} 或 P_d ,真正的 SCR 值可以通过把 CFAR 损失加到由斯威林曲线确定的 SNR 值上获得。CFAR 损失使我们可以根据经典斯威林曲线评价瑞利包络杂波、噪声环境中的性能。因为检测性能是一个重要的准则,不同的 CFAR 策略和滑窗尺寸可以用它们的 CFAR 损失来表征。采用单脉冲线性和双门限检测策略的均值类 CFAR 检测器的 CFAR 损失在第 2 章中讨论。第 3, 4, 5 章分别讨论有序统计量(OS)类、广义有序统计量(GOS)类和自适应类 CFAR 检测器采用单脉冲线性检测和双门限检测策略的 CFAR 损失。

在许多包含杂波和干扰的实际检测问题中,实际的包络概率密度函数也许与瑞利分布不一致。在许多环境中所获得的实验数据表明用对数正态和韦布尔分布能更准确地模拟许多类型的杂波回波包络^[7~9]。关于在对数正态和韦布尔杂波环境中普遍应用的检测策略和 CFAR 技术在第 6, 7 章中描述。

在非瑞利杂波、噪声环境中,除了可以用韦布尔和对数正态分布模型模拟杂波、噪声包络之外,K 分布和 Rice 分布模型也是很好的选择。K 分布模型可以在很宽范围内很好地模拟高分辨力海杂波包络分布^[10],并且还能很好地模拟脉冲之间的相关性,包括雷达频率捷变的影响。如果在均匀的地面目标中存在着与众不同的分立目标,例如,铁塔、烟囱、高大的建筑物等,则杂波包络服从 Rice 分布,也称作广义瑞利分布。当 Rice 分布的尖杂波强度等于零时,即为瑞利分布。有关 K 分布和 Rice 包络杂波中的检测及 CFAR 处理问题在第 8 章中展开讨论。

非参量 CFAR 处理器也已应用于瑞利和非瑞利杂波、噪声环境中的自动检测。人们设计非参量检测器的目的是当存在有不确定的或变化的杂波、噪声包络统计量时提供 CFAR 检测,它对背景杂波或噪声分布是不敏感的。最常见的技术是利用参考单元采样求取检测单元的秩。与参量检测策略比较,非参量策略在非瑞利包络杂波、噪声环境中通常提供较大的检测效能和更稳定的虚警控制。非参量检测策略的代价是,当检测是在瑞利包络杂波中进行时,其检测效能相对于参量策略有所降低。非参量检测原理和一些常用的非参量检测策略在第 9 章中讨论。

雷达自动检测和 CFAR 处理除了在时域上进行以外,也可以把数据变换到频域上做 CFAR 处理。它的背景干扰包括接收机热噪声、旁瓣杂波、主瓣杂波剩余,相应的 CFAR 处理方法就是对抗这些干扰。在第 10 章中讨论频域 CFAR 技术。

前述的几个 CFAR 研究领域是发展较早且研究较多的领域。除此之外,还有一些尚未成熟的或者研究较少的领域,但这往往是与新的雷达技术相结合的领域,因此,它们的发展有很好前景。在第 11 章中讨论了用于这些领域的其它的 CFAR 处理方法。

为了总结过去,展望未来,第 12 章对本书的讨论内容作了简要回顾,提出了一些有待进一步研究的课题并指出了今后的研究方向。

参 考 文 献

- [1] North D O. An Analysis of the Factors which Determine Signal/Noise Distribution in Pulsed Carrier System. IEEE Proc., 1963;1015~1028
- [2] Rice S O. Mathematical Analysis of Random Noise. Bell System Technical Journal, 1994, 23:282~332, 1945, 24:145~156
- [3] Marcum J I. A Statistical Theory of Detection by Pulsed Radar and Mathematical Appendix. IRE Trans. on IT, 1960, 6:259~267
- [4] Swerling P. Probability of Detection for Fluctuating Targets. IRE Trans. on IT, 1960, 6:269~308
- [5] Durrance J V, Rubin W J. Radar Detection. Prentice-Hall, 1968
- [6] Lawson J L, Uhlenbeck G E. Threshold Signals. In: MTI Radiation Laboratory Series, Vol. 24. New York: McGraw-Hill, 1950
- [7] Rohling H. Methoden und Leistungsfähigkeit der radarzielentdeckung in inhomogenen Cluttregebieten (Teil). Frequenz, 1987, 41(4):96~101
- [8] He You (何友). Leistungsfähigkeit der Order Statistics Constant False Alarm Rate (OS-CFAR) Schaltung vor einem Weibull-Störhintergrund. Ortung und Navigation, 1993, 20(2):133~155
- [9] 何友, Rohling H. 有序统计恒虚警(OS-CFAR)检测器在韦布尔干扰中的性能. 电子学报, 1995, 23(1):79~84
- [10] Ward K D. Compound Representation of High Resolution Sea Clutter. Electronics Letters, 1981, 17(16):561~563

目 录

绪论	XVII
参考文献	XIX
第 1 章 雷达自动检测原理	1
1.1 基本问题	1
1.1.1 最大检测距离	2
1.1.2 虚警率	3
1.2 目标雷达截面积起伏的斯威林模型	4
1.3 自动检测的经典问题	5
1.3.1 基本模型描述	5
1.3.2 单脉冲检测	7
1.3.3 多脉冲检测	17
1.4 小结	31
参考文献	31
第 2 章 均值类 CFAR 检测器	32
2.1 引言	32
2.2 基本模型描述	32
2.3 CA—CFAR 检测器	36
2.4 GO,SO—CFAR 检测器	37
2.5 WCA—CFAR 检测器	38
2.6 采用对数检波的 CA—CFAR 检测器	39
2.7 单脉冲线性 CA—CFAR 检测器	39
2.8 多脉冲 CA—CFAR 检测器	40
2.8.1 双门限 CA—CFAR 检测器	40
2.8.2 多脉冲线性 CA—CFAR 检测器	40
2.9 ML 类 CFAR 检测器在均匀杂波背景中的性能	42
2.10 ML 类 CFAR 检测器在多目标环境中的性能	43
2.11 ML 类 CFAR 检测器在杂波边缘环境中的性能	45
2.12 比较与小结	47
参考文献	48
第 3 章 有序统计量类 CFAR 检测器	51
3.1 引言	51
3.2 基本模型描述	51
3.3 OS—CFAR 检测器	52

3.4	CMLD—CFAR 检测器	54
3.5	TM—CFAR 检测器	55
3.6	其它的 OS 类 CFAR 检测器	57
3.6.1	最大类有序统计量 CFAR 检测器	57
3.6.2	OSGO, OSSO—CFAR 检测器	57
3.7	OS 类 CFAR 检测器在均匀杂波背景中的性能	58
3.8	OS 类 CFAR 检测器在多目标环境中的性能	59
3.9	OS 类 CFAR 检测器在杂波边缘环境中的性能	61
3.10	比较与小结	62
	参考文献	64
第 4 章	采用自动筛选技术的 GOS 类 CFAR 检测器	66
4.1	引言	66
4.2	基本模型描述	66
4.2.1	OS—OS 类 CFAR 检测器的模型描述	66
4.2.2	OS—CA 类 CFAR 检测器的模型描述	70
4.3	GOSCA, GOSGO, GOSSO—CFAR 检测器	71
4.3.1	GOSCA—CFAR 检测器	71
4.3.2	GOSGO—CFAR 检测器	73
4.3.3	GOSSO—CFAR 检测器	75
4.4	MOSCA, OSCAGO, OSCASO—CFAR 检测器	76
4.4.1	MOSCA—CFAR 检测器	76
4.4.2	OSCAGO—CFAR 检测器	78
4.4.3	OSCASO—CFAR 检测器	80
4.5	GOS 类 CFAR 检测器在均匀杂波背景和多目标环境中的性能	82
4.5.1	GOS 类 CFAR 检测器在均匀杂波背景中的性能	82
4.5.2	GOS 类 CFAR 检测器在多目标环境中的性能	83
4.6	GOS 类 CFAR 检测器在杂波边缘环境中的性能	86
4.6.1	GOSCA—CFAR 检测器在杂波边缘环境中的性能	86
4.6.2	GOSGO, GOSSO—CFAR 检测器在杂波边缘环境中的性能	90
4.6.3	MOSCA—CFAR 检测器在杂波边缘环境中的性能	94
4.6.4	OSCAGO, OSCASO—CFAR 检测器在杂波边缘环境中的性能	98
4.7	比较与小结	106
4.7.1	均匀杂波背景	106
4.7.2	多目标环境	106
4.7.3	杂波边缘环境	107
	参考文献	107
第 5 章	自适应 CFAR 检测器	109
5.1	引言	109

5.2	CCA—CFAR 检测器	109
5.3	HCE—CFAR 检测器	111
5.4	E—CFAR 检测器	113
5.4.1	E—CFAR 检测器结构	113
5.4.2	E—CFAR 检测器在均匀杂波背景中的性能	114
5.4.3	E—CFAR 检测器在多目标环境中的性能	115
5.5	OSTA—CFAR 检测器	116
5.5.1	OSTA—CFAR 检测器基本原理	116
5.5.2	OSTA—CFAR 检测器在杂波边缘环境中的性能	117
5.5.3	OSTA—CFAR 检测器在多目标环境中的性能	117
5.6	VTM—CFAR 检测器	118
5.6.1	VTM—CFAR 检测器基本原理	118
5.6.2	VTM—CFAR 检测器在均匀杂波背景中的性能	119
5.6.3	VTM—CFAR 检测器在多目标环境中的性能	120
5.6.4	VTM—CFAR 检测器在杂波边缘环境中的性能	120
5.6.5	VTM—CFAR 检测器的参数选择	121
5.7	Himonas 的一系列 CFAR 检测器	122
5.7.1	GCMLD—CFAR 检测器	122
5.7.2	GO/SO—CFAR 检测器	124
5.7.3	ACMLD—CFAR 检测器	126
5.7.4	GTL-CMLD—CFAR 检测器	127
5.7.5	ACGO—CFAR 检测器	131
5.8	其它的自适应 CFAR 检测器	133
5.8.1	双重自适应 CFAR 检测器	133
5.8.2	AC—CFAR 检测器	133
5.8.3	改进的 CA—CFAR 检测器	134
5.8.4	自适应长度 CFAR 检测器	134
5.9	比较与小结	135
	参考文献	136
第 6 章	韦布尔和对数正态杂波背景中的 CFAR 技术	138
6.1	引言	138
6.2	韦布尔和对数正态杂波中的检测策略	139
6.2.1	单脉冲线性检测	139
6.2.2	多脉冲线性检测	143
6.2.3	双门限检测	146
6.2.4	对数检测	147
6.3	单元平均 CFAR 检测器	149
6.3.1	单脉冲线性单元平均 CFAR 检测器	150

6.3.2	多脉冲线性单元平均 CFAR 检测器	153
6.3.3	双门限单元平均 CFAR 检测器	155
6.4	具有高通滤波器的对数检测器	156
6.5	Log-t CFAR 检测器	158
6.6	小结	164
	参考文献	164
第 7 章	两参数 CFAR 技术	166
7.1	引言	166
7.2	韦布尔分布杂波中的 OS—CFAR 检测器	166
7.2.1	OSTWO—CFAR 检测器	166
7.2.2	基于两个以上有序采样的阈值估计方法	169
7.2.3	用参考单元采样的期望和中值的估值估计 c 的方法	172
7.3	MLH—CFAR 检测器	177
7.3.1	形状参数已知的韦布尔杂波背景中的 MLH—CFAR	177
7.3.2	未知形状参数的韦布尔杂波背景中的 MLH—CFAR	179
7.3.3	检测概率和 CFAR 损失	181
7.4	BLUE—CFAR 检测器	184
7.4.1	韦布尔杂波背景中的 BLUE	184
7.4.2	对数正态杂波背景中的 BLUE	191
7.4.3	其它的方法和研究	196
7.5	比较与小结	196
	参考文献	197
第 8 章	K 分布和莱斯分布杂波中的 CFAR 处理	199
8.1	引言	199
8.2	基本数学模型	199
8.2.1	复合形式的 K 分布杂波模型	199
8.2.2	相关 K 分布杂波模型	201
8.2.3	相关 K 分布杂波的仿真	202
8.2.4	莱斯分布杂波模型	202
8.3	K 分布海杂波加热噪声中的检测	203
8.3.1	K 分布与记录数据的匹配	203
8.3.2	在杂波加噪声中对目标检测的计算	204
8.3.3	对 K 分布海杂波加热噪声中的检测性能分析	206
8.4	K 分布杂波中的 CFAR 处理	208
8.4.1	调制过程不相关时 K 分布杂波中的 CFAR 检测	208
8.4.2	调制过程完全相关时的 K 分布杂波中的 CFAR 检测	214
8.4.3	调制过程部分相关时的 K 分布杂波中的 CFAR 检测	216
8.4.4	最优 CFAR 检测	220

8.5	莱斯分布杂波中的 CFAR 处理	221
8.5.1	似然比检测器	222
8.5.2	结合杂波图的 CFAR 检测器	222
8.5.3	MTD 雷达零速通道性能的改善	225
8.6	小结	226
	参考文献	227
第 9 章	非参量 CFAR 处理	230
9.1	引言	230
9.2	符号检测器	231
9.2.1	符号检测器原理	232
9.2.2	未知相位情况下的修正符号检测器	234
9.3	Wilcoxon 检测器	236
9.3.1	Wilcoxon 检测器原理	236
9.3.2	未知相位情况下的修正 Wilcoxon 检测器	237
9.4	两样本符号和两样本 Wilcoxon 检测器	239
9.4.1	广义符号检测器	239
9.4.2	修正的广义符号检测器	240
9.4.3	Mann-Whitney 检测器	245
9.5	序贯检测	245
9.5.1	非参量 CFAR 处理的两种结构形式	245
9.5.2	序贯检测原理	246
9.5.3	两种二级 CFAR 检测器	248
9.6	比较与小结	254
	参考文献	254
第 10 章	频域 CFAR 处理	257
10.1	引言	257
10.2	信号和杂波噪声的 DFT 处理	257
10.3	频域的 CA—CFAR 检测器	259
10.3.1	频域 CA—CFAR 检测器	259
10.3.2	MTI-FFT-频域 CA—CFAR 方案	260
10.4	双通道频域 CFAR 检测器	265
10.4.1	系统结构	265
10.4.2	系统工作性能	266
10.5	比较与小结	267
	参考文献	268
第 11 章	其它 CFAR 处理方法	270
11.1	引言	270
11.2	阵列信号的 CFAR 处理	270

11.2.1	Reed, Mallett 和 Brennan 的工作	270
11.2.2	基于广义似然比检验的算法	270
11.2.3	自适应匹配滤波 CFAR 检测器	271
11.3	数据融合分布式 CFAR 处理	272
11.4	相关信号的 CFAR 处理	273
11.5	极化 CFAR 处理	274
11.6	应用图象处理技术的 CFAR 处理	275
11.7	雷达其它部分的 CFAR 处理	275
11.8	小结	276
	参考文献	276
第 12 章	回顾、建议与展望	279
12.1	回顾	279
12.2	问题与建议	280
12.3	研究方向展望	281
	参考文献	282
	英文缩略语	285

CONTENTS

Preface	XVI
Reference	XIX
Chapter 1 Principles of Automatic Radar Detection	1
1.1 Fundamental Problems	1
1.1.1 Maximum Detection Range	2
1.1.2 False Alarm Rate	3
1.2 Swerling Models for Target Radar Cross Section Fluctuation	4
1.3 Classical Problems of Automatic Detection	5
1.3.1 Description of Basic Models	5
1.3.2 Single-Pulse Detection	7
1.3.3 Multiple-Pulse Detection	17
1.4 Summary	31
Reference	31
Chapter 2 Mean-Level Type CFAR Detectors	32
2.1 Introduction	32
2.2 Description of Basic Models	32
2.3 CA—CFAR Detector	36
2.4 GO,SO—CFAR Detectors	37
2.5 WCA—CFAR Detector	38
2.6 Logarithmic CA—CFAR Detector	39
2.7 Single Pulse Linear CA—CFAR Detector	39
2.8 Multiple-Pulse CA—CFAR Detector	40
2.8.1 CA—CFAR Detector with Double Threshold	40
2.8.2 Multiple-Pulse Linear CA—CFAR Detector	40
2.9 Performance of ML CFAR Detectors in Homogeneous Background	42
2.10 Performance of ML CFAR Detectors in Multiple Target Situations	43
2.11 Performance of ML CFAR Detectors in Clutter Edge Situation	45
2.12 Comparison and Summary	47
Reference	48
Chapter 3 Order Statistics Type CFAR Detectors	51
3.1 Introduction	51
3.2 Description of Basic Models	51
3.3 OS—CFAR Detector	52

3.4	CMLD—CFAR Detector	54
3.5	TM—CFAR Detector	55
3.6	Other OS Type CFAR Detectors	57
3.6.1	Maxium Type Order Statistics CFAR Detectors	57
3.6.2	OSGO,OSSO—CFAR Detectors	57
3.7	Performance of OS Type CFAR Detectors in Homogeneous Background	58
3.8	Performance of OS Type CFAR Detectors in Multiple Target situations	59
3.9	Performance of OS Type CFAR Detectors in Clutter Edge Situation	61
3.10	Comparison and Summary	62
	Reference	64
Chapter 4	GOS Type CFAR Detectors with Automatic Censoring Technique	66
4.1	Introduction	66
4.2	Description of Basic Models	66
4.2.1	Model Description of OS—OS Type CFAR Detectors	66
4.2.2	Model Description of OS—CA Type CFAR Detectors	70
4.3	GOSCA,GOSGO,GOSSO—CFAR Detectors	71
4.3.1	GOSCA—CFAR Detector	71
4.3.2	GOSGO—CFAR Detector	73
4.3.3	GOSSO—CFAR Detector	75
4.4	MOSCA,OSCAGO,OSCASO—CFAR Detectors	76
4.4.1	MOSCA—CFAR Detector	76
4.4.2	OSCAGO—CFAR Detector	78
4.4.3	OSCASO—CFAR Detector	80
4.5	Performance of GOS Type CFAR Detectors in Homogeneous Background and Multiple Target Situations	82
4.5.1	Performance of GOS Type CFAR Detectors in Homogeneous Background	82
4.5.2	Performance of GOS Type CFAR Detectors in Multiple Target Situations	83
4.6	Performance of GOS Type CFAR Detectors in Clutter Edge Situation	86
4.6.1	Performance of GOSCA—CFAR Detectors in Clutter Edge Situation	86
4.6.2	Performance of GOSGO,GOSSO—CFAR Detectors in Clutter Edge Situation	90
4.6.3	Performance of MOSCA—CFAR Detector in Clutter Edge Situation	94