

自适应阵导论

〔美〕罗伯特·A.蒙津戈 托马斯·W.米勒 著

沈铁汉 梁福生 石 镇 译

国防工业出版社



自适应阵导论

〔美〕 罗伯特·A·蒙津戈 著
托马斯·W·米勒

沈铁汉 梁福生 石 镇 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是全面论述自适应阵的专著。全书分三篇(12章)。第一篇为第一至第三章,主要讨论自适应阵的基本概念、特性和作用;介绍系统的组成及最优化理论。第二篇为第四至第十章,主要讨论自适应阵的各种算法,包括梯度算法、豪韦尔斯-阿普尔鲍姆算法、取样协方差矩阵算法、递归算法、级联预处理算法、随机寻优算法等,是本书的核心部分。第三篇为第十一、十二两章,主要讨论自适应阵系统误差的补偿以及自适应阵研究的当前趋势。

本书属一门边缘性分支学科,可供电子类有关专业——通信、雷达、天线、自控、信号、遥测、射电天文、地震预测、超声技术等科研、教学、工程技术人员参考,也可作大专院校高年级学生及研究生教材。

Introduction to Adaptive Arrays

Robert A. Monzingo

Thomas W. Miller

John Wiley and Sons, Inc. 1980

自 适 应 阵 导 论

[美] 罗伯特·A. 蒙津戈 著
托马斯·W. 米勒

沈铁汉 梁福生 石 镇 译

责任编辑 耿新暖

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 $1/16$ 印张22 508千字

1988年3月第一版 1988年3月第一次印刷 印数: 0,001—1,000册

ISBN7-118-00244-5/TP24 定价: 5.60元

译者前言

在新技术革命中,信息是与能源及材料并列,为人类要予大力开发利用的三大资源之一。信息技术,包括它的性质、发生、传输、检测、存储、处理和控制等基本内容。

载信息的信号的发出、传输、检测、处理过程是包括无线通信、雷达、导航、测向、遥控、遥感、遥测、制导、声纳、射电天文、地震探测、超声技术等许多技术领域所具有的共同过程。

在信道中,不可避免地掺杂着降低接收质量的干扰噪声。尤其在军事领域中大为发展并广泛应用的快速机警的电子干扰技术已用来进行电子对抗战,作战双方竭力追求电磁制空权,使对方无线电子设备不能正常工作;通信指挥失灵、雷达迷盲、电子制导失控、采用电子技术的兵器功能紊乱,乃致使对方作战系统陷入一片混乱之中。所以抑制干扰并增强和改进所需信号的接收,便成为前述各种应用中最为关心的重大问题。

“所需(有用)信号”和“干扰信号”之间至少存在某一方面的差别,一般说来它们包括来向、极化、电平、频率结构、时间结构、编码以及统计特性等方面差别。科学技术人员正是利用它们之间的不同来抑制干扰与增强信号接收的。针对以上种种差别,人们发展了各种滤波技术与理论,这些技术的共性乃是不同宗量意义上的阵结构。信号(包括有用信号与干扰信号)环境往往是快速随机变化的,这就要求具有实时自动适应信号环境进行各种意义的滤波能力。近二十年来,人们对自适应阵滤波进行了理论、实验、工程技术与应用的研究。

自适应阵理论与实际应用于天线,形成了具有空间滤波、极化滤波、波束成形、频扫相控以及散射成像等各种功能的自适应天线,这是天线技术一个崭新的内向寻优的重要分支。

本书就是1980年在美国出版的第一本全面论述自适应阵的专著,被认为是一本扫除了自适应阵继续向前发展的一个障碍的好书,因为近二十年来关于自适应阵理论及应用已发表了大量文献,但迄今没有成书,所以这样一本集大成且组织到较易为读者所理解的书,确实是学习和开展自适应阵工作所迫切需要的。

本书的内容,著者在前言中作了概述。本书可用作广义无线电学科研究生课程教科书,又可供高等科技工作者和系统分析人员参考。自适应阵理论是一门边缘性分支学科。学习它,读者最好具有信息论、控制论、信号检测与估计、信号处理、计算机软件、天线阵理论、最优化理论、概率统计与随机过程等方面的知识。由于作者对自适应阵的讨论是由浅入深、循序渐进的,所以读者不必对上述理论有全面的深入的了解。作者对导论性材料讲述得极好,又相当成功地进行了各个主题材料的数学分析及论述。全书很好地组织了每章末尾的练习题,累计75题,这些练习题大多属于扩展性材料,向读者介绍实用自适应阵工程问题,促使读者自己去扩展各章的主题内容。全书各章累计提供了317篇文献(截至1979年),对于深入钻研自适应阵的各个方面具有很大的扩展与参考价值。学习本书,对于了解、掌握、发展自适应阵这一新的理论与技术,无疑是一个捷径。

本书第一篇由沈铁汉教授执译、第二篇由石镇同志执译,第三篇与附录由梁福生同志执译。翻译时对原著中少量明显差错作了修正。译本中不当之处,谨请读者指正。

前 言

本书扼要论述自适应阵传感器系统。这种系统的基本目的是增强检测和接收所需信号的能力。众所周知,阵传感器系统,具有提供快速而灵活的波束成形和零化调向方向图的优点。阵传感器系统的这一优点变得越来越重要,这种系统已经在通信、雷达、声纳、射电天文、地震探测和超声技术等领域中获得应用。自适应阵系统的重要性与日俱增,这同广泛应用小型廉价的数字计算机是分不开的。这种计算机使得人们利用信号处理与控制理论的某些熟知理论成果提供构成自适应阵系统核心的关键性的自调整能力成为可能。

自适应阵传感器系统,现在已是一项成熟的技术。随着其应用的日益增长与扩大,已有广为流传的关于这种系统各个方面的大量文献。甚至已有几本教科书简要介绍自适应阵系统的某些方面。但是至今还没有一本系统地介绍这种系统的书籍能把现有文献组织成易于理解的材料提供给读者。本书便是为弥补这一不足而决定编写的。本书侧重介绍现代自适应阵系统的基本原理和主要方法。虽然书中也包含了一些原始材料,但是绝大部分内容都选自公开发表的文献。

本书既可用作研究生的教材,又可用作工程师、科学工作者和系统分析人员的参考书。书中内容,对于具有适当的天线阵理论,信号处理理论(通信论和估计理论)、最优化理论、控制理论、与概率论和统计学等基础知识的读者,将是容易理解的。本书并不要求读者具备上述完全的基础知识,因为书中在引用上列理论的基本理论和重要方法进行讨论过程中是循序前进的,而且有兴趣进一步探讨这些理论的读者,可以参看所提供的大量书籍和文献。本书先介绍基本概念,并举例说明,随后介绍自适应阵系统新近的进展。每一章末尾都附有一定数量的习题,题目的挑选是为了说明和扩展书中内容。属于扩展的材料,向读者介绍实用自适应阵工程问题,促使读者进一步阅读背景参考资料。这样一来,学生和实际工作人员都能较易地熟悉现代自适应阵对实用信号接收系统所能提供的贡献。

本书包括三篇。第一篇(第一章到第三章),介绍采用自适应阵传感器系统的好处,说明系统的主要组件,推导任何阵系统理论上能达到的最优稳态性能极限。文献中已发表了许多种自适应算法,除了少数几种算法以外直接比较各种算法所做的工作不多。第二篇(第四章到第十章)为设计工作人员论述各种自适应算法,每一种算法都有一个性能提要。有了这些知识,设计工作人员就可以很快找出在具体信号环境和系统约束条件下最有成效的那些算法。第三篇(第十一章和第十二章),介绍任何实际系统中不可避免的自适应阵系统误差的补偿问题,以及自适应阵研究的当前趋势。我们期望本书在运用数学工具分析自适应阵技术上获得成功,使得广大读者对自适应阵技术与理论感到有用、易于接受而且兴趣盎然。

罗伯特·A.蒙津戈

托马斯·W.米勒

1980年7月于加利福尼亚州富勒顿(Fullerton)

目 录

第一篇 自适应阵基本原理

第一章 引论	1
1.1 采用自适应阵的动因	1
1.2 自适应阵历史的回顾	2
1.3 自适应阵系统的主要组成单元	3
1.4 自适应阵问题概述	4
1.5 目前采用自适应阵的几种技术	6
1.6 本书内容简介	13
1.7 摘要和结论	14
习题	15
参考文献	15
第二章 自适应阵概念	19
2.1 信号环境	19
2.2 阵元配置理论	22
2.3 传感器阵的性能	29
2.4 各种阵效应对零陷的限制	35
2.5 窄带信号处理和宽带信号处理概念	37
2.6 摘要和结论	40
习题	40
参考文献	48
第三章 自适应阵最优化处理: 稳态性能极限与维纳解	50
3.1 数学准备	51
3.2 常规阵与信号整相阵的信号表述	55
3.3 窄带应用的阵最优化处理	56
3.4 宽带阵的最优化处理	67
3.5 微扰传播条件下的最优阵处理	81
3.6 摘要和结论	84
习题	84
参考文献	94

第二篇 自适应算法

第四章 基于梯度的算法	97
4.1 引论	97
4.2 最小均方 (LMS) 算法	102
4.3 微分最陡下降 (DSD) 算法	112
4.4 加速梯度 (AG) 算法	118
4.5 约束梯度算法	120

4.6	模拟结果	129
4.7	摘要和结论	132
	习题	132
	参考文献	135
第五章	豪韦尔斯-阿普尔鲍姆自适应处理器	137
5.1	引论	137
5.2	单环自适应2元阵	141
5.3	有 N 个自适应环的 N 元阵	155
5.4	主波束约束导论	173
5.5	已知所需信号功率电平下的约束	179
5.6	摘要和结论	182
	习题	182
	参考文献	184
第六章	取样协方差矩阵的直接求逆	186
6.1	直接矩阵求逆(DMI)算法	186
6.2	暂态响应比较	194
6.3	对特征值散布的灵敏度	197
6.4	摘要和结论	198
	习题	198
	参考文献	201
第七章	自适应阵处理的递归法	203
7.1	加权的最小平方误差处理器	203
7.2	更新协方差矩阵求逆	206
7.3	自适应阵处理的卡尔曼滤波器法	208
7.4	最小方差处理器	213
7.5	模拟结果	217
7.6	摘要和结论	220
	习题	220
	参考文献	221
第八章	级联预处理器	223
8.1	诺伦网络预处理器	223
8.2	诺伦网络预处理器的干扰对消	229
8.3	格莱姆-施密特正交化预处理器	233
8.4	模拟结果	241
8.5	摘要和结论	245
	习题	245
	参考文献	249
第九章	随机寻优算法	250
9.1	线性随机寻优(LRS)算法	250
9.2	加速随机寻优(ARS)算法	255
9.3	制导加速随机寻优(GARS)算法	257
9.4	模拟结果	258

9.5 摘要和结论	263
习题	263
参考文献	266
第十章 自适应算法性能总结	268

第三篇 自适应阵补偿与当前发展趋势

第十一章 自适应阵补偿	272
11.1 关于宽带信号处理的考虑	272
11.2 多径补偿	285
11.3 通道间失配效应的分析	292
11.4 摘要和结论	300
习题	301
参考文献	303
第十二章 自适应阵研究当前趋势	304
12.1 频谱估计的最大熵算法 (MEM)	304
12.2 贝叶斯最优阵处理器的序列实现	312
12.3 部分自适应阵概念	314
12.4 摘要和结论	319
习题	319
参考文献	324
附录 A 抽头延迟线的频率响应特性	326
附录 B 复包络标记法	328
附录 C 梯度运算的简便公式	331
附录 D 有用的矩阵关系式和施瓦茨不等式	331
附录 E 多变量高斯分布	333
附录 F 复矢量关系的几何关系	337
附录 G 基本符号名称	338

第一篇 自适应阵基本原理

本篇主要包括：自适应阵的应用，自适应阵系统单元，自适应阵基本概念，以及自适应阵最优化处理。

第一章 引 论

我们知道，单一传感器^①方向（性）图的波束很宽，方向（性）系数很低。为了压窄方向图波束宽度和提高方向系数起见，可以把若干个传感器单元组成一个传感器阵。长期以来，人们就是使用这种阵去接收所需信号。它是解决信号检测与估计这个严峻问题的一种非常吸引人的办法。人们早已建立起信号统计检测与估计理论和信号处理与控制理论，然而直到前不久，只是由于有了既紧凑又价廉的电子数字计算机，才有可能应用这些理论研制出能够对正在变化着的信号环境（包括干扰和噪声）自动响应的传感器阵系统。一个传感器阵系统具有自调整性能或自适应信号环境的能力，使得它的功能更灵活更可靠，而更重要的是它的接收性能获得改善，这是用其它任何办法都很难实现的。

1.1 采用自适应阵的动因

在信号环境中，不可避免地存在着不需要的“噪声”信号，它或者通过方向图的边波束或者通过主波束进入接收系统，所以常规信号接收系统的信噪比（SNR）性能极易因之降低。噪声信号，包括敌方精心施放的电子干扰（ECM），友邻电台的 RF 无线电干扰（RFI），各种散射体的杂乱回波，以及自然噪声源的干扰等。由于天线运动、天线场地条件不良、电波传播多经射线效应以及干扰环境不断变化等因素的影响，上述 SNR 降低很可能还要进一步扩大。今天，雷达站和通信台日益增多，抗干扰问题在各种应用中都变得越来越严重。

当前，在雷达、声纳、地震探测和通信等系统中，作为降低干扰损害所需信号程度的一种手段，自适应阵是一个被人们广泛深入研究的重要课题。之所以普遍对自适应阵系统感兴趣，主要在于这种系统既具有自动感知存在着干扰源并抑制其影响的能力，又具有增强所需接收信号的能力，在此过程中并无需关于所需信号和干扰环境的先验信息。还可设计自适应阵，用来辅助其它抗干扰技术，比起单纯依靠一种常规手段（如采用扩展频谱技术，或者采用强定向性传感器）来，这样做所获得的实际抗干扰能力要更大。

① 所谓传感器，是具有感知某种信息，并使所感知的信息便于以某种形式传输的功能的装置。无线电天线是传感器的一种。——译注

自适应阵是一个由传感器阵和实时自适应信号接收机-处理机所组成的系统,它能够自动调整传感器阵的灵敏度方向图,使得阵性能的质量量度得到改善。自适应阵比起常规阵性能上更可靠。常规阵中如有一个传感器单元失效,由于边波束增大,阵灵敏度方向图的边波束结构要明显地变坏。自适应阵则不然,阵内其余正在工作的传感器的响应,可以自动调整直到阵边波束减小到一个可以接受的电平为止。所以自适应阵很不同于常规阵,它具有很高的可靠性。普通阵的波束方向图,通常受近场散射的影响比起受其自由空间固有方向图的影响更厉害。例如,倘若把一部低边波束天线装在飞机上,机尾和机翼将完全改变天线的定向性灵敏度方向图。然而,自适应阵即使天线方向图遭到近场效应的严重畸变,也往往能富有成效地工作。

检验自适应阵的功能,以考察阵波束灵敏度方向图响应最为容易。把方向图波束的零陷(null)适当调向干扰源方向,并降低边波束电平,即可做到抑制干扰信号;与此同时,保持合乎要求的主波束(信号波束)特性,即可保证接收所需信号。自适应阵系统正是紧紧依靠这种空间特性改进了输出SNR。灵敏度方向图可以在窄频带内形成很深的零陷,所以抑制很强的干扰是可行的。具有这种特别强的抗干扰能力,乃是自适应阵的主要长处。波形处理抗干扰技术就不具备这种特别强的抗干扰能力。一般来说,为了获得同数量级的抗干扰能力,波形处理抗干扰技术需有很大的扩频谱比。具有这种关键性自动响应能力的传感器阵,有时叫做“灵巧”阵,因为同常规阵系统相比,它能对传感器输出中多得多的信号信息发生响应。

本书要讨论的自适应阵技术,其所具备的能力,提供解决上述现实抗干扰问题的实际办法,由于这种能力而能选出并鉴别空域中、频域中以及极化上各种不同的信号。目前,自适应零陷(nulling)作用,是自适应阵系统采用自适应技术的主要效益所在,边波束干扰自动对消(cancellation)作用,为雷达系统提供极有价值的电子抗干扰(ECCM)能力。设计自适应阵,可以结合传统技术,象自聚焦(self-focusing)接收技术和返向(retrodirective)发射技术等。除了采用自动干扰零化技术和自动波束调向技术之外,还可设计自适应成象(imaging)阵,以获得角分辨率很高的微波成象。我们可以把自相控阵或返向阵叫做**自适应发射阵**,而把这类阵的主要功能同**自适应接收阵**的主要功能区别开来。本书集中讨论自适应接收阵。

1.2 自适应阵历史的回顾

范阿特(Van Atta^[1])及其他人^[2],首先使用“自适应天线”这个术语,用来表述向来波方向自动再发射信号的自相控天线系统,它起着“返向”系统的作用,在此过程中无需发射信号方向的任何先验信息。由于使用了强的引导信号,故返向阵在点对点卫星通信中获得了应用;返向系统可以克服通常的波束宽度过窄(因而方向系数过大)所带来的缺陷,道理是返向阵能够自动把引导信号送回原发射站,故利用许多单元组成阵面而得到很大的方向系数是容许的。

自调向(或自相控)型自适应阵之所以可能研制成功,另一个主要因素是锁相环技术取得了进展^[3]。自相控阵可以定义为,其每一阵元依据自身所接收信号获取的信息而独立地调整相位的天线阵。例如,几座其波束可随动调向的大口面接收天线,可以各自根据所接收的来自卫星或宇宙飞船的信号而自我控制相位,从而使有效接收口面面积是

所有天线单个有效接收口面面积之和。

六十年代初,豪韦尔斯(Howells)提出并发展了自适应干扰零陷这一关键性技术^[4,5]。随后,阿普尔鲍姆(Applebaum)从分析使广义SNR最大的算法中,建立起豪韦尔斯自适应零陷方案的控制定律^[6]。同时,威德鲁(Widrow)及其他人,把自适应或自最优化控制的能力赋予自适应阵^[7~9]。他们在自最优化控制的研究工作中基于最陡下降法建立了最小均方误差算法。阿普尔鲍姆算法和威德鲁算法这两者是很相似的,且都收敛于最优化维纳(Wiener)解。

到阿普尔鲍姆和威德鲁的早期自适应算法研究工作完成的时候,使用传感器阵接收声纳和雷达信号早已成为普通的事情^[10,11]。早期关于阵输出处理的研究工作,一般是放在如何获得“所需”定向性波束方向图上,后来注意力转移到如何改进SNR的问题^[12~14]。地震探测阵的研究工作大约开始于同一时期,所以关于应用地震探测阵探测远处地震的论文出现于六十年代末期^[15~17]。

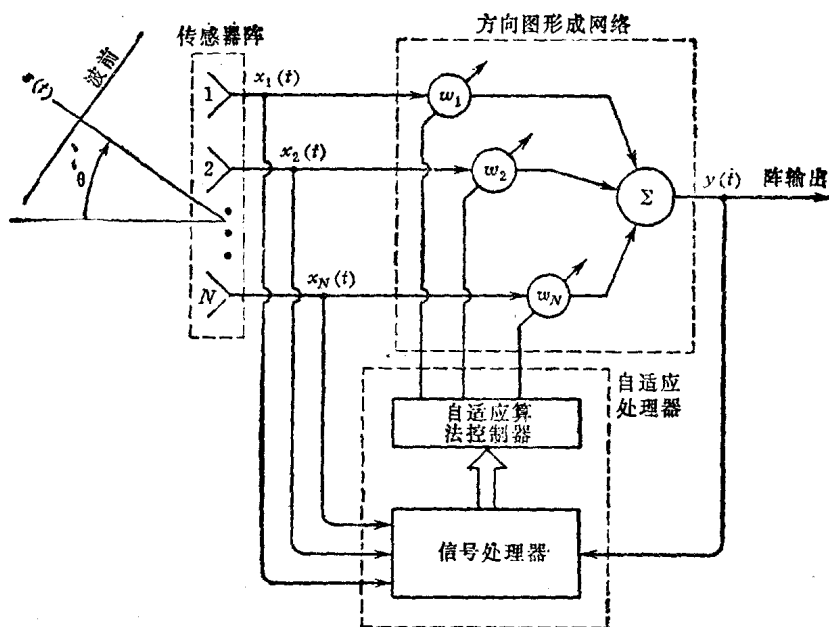
当前,自适应阵主要用于解决雷达和通信系统中出现的问题,设计人员要解决的这些问题,几乎无例外地都是抗干扰问题^[18]。在严重干扰环境下使用它进行无线电测向,是第二个采用自适应阵的例子^[19,20]。另一个日益证明自适应阵有用的场合,是在阵元位置不确知的条件下使用传感器单元组成的阵能够成为自适应波束形成与扫描系统^[21]。还有,大型非结构天线阵系统,可以使用自适应阵技术来实现高分辨率的成像^[22,23]。

设计人员必须熟悉各种自适应算法的长处和短处,必须会根据任何特定情况选择算法使自适应阵系统能够成功地发生期望的响应。前十年,科学研究工作的一个主攻方向,是使部分自适应阵能在工作环境中获得满意的SNR性能。科学研究工作的另一个主攻方向,是要求获得更快的暂态响应,从而系统有可能迅速地自动适应变化着的所需信号和干扰环境,特别是要自动适应这样的环境:其中机警的施放干扰者熟练地协调地操纵几个干扰源,企图使自适应阵调整算法达不到所需要达到的目标。当前,兼有自适应波束抑制能力的自适应滤波技术的研究工作已经开始,它具有生产高度先进自适应系统的潜力。这种高度先进的自适应系统应能对抗绝大多数友邻无线电台射频干扰(RFI)、杂乱回波干扰和敌方施放干扰。

1.3 自适应阵系统的主要组成单元

自适应阵功能框图如图1.1所示,它画出了自适应阵系统的主要组成单元。倘若要求成功地达到既增强接收所需信号又抑制不需要的干扰信号这两个目标,自适应阵系统就必须具备这些组成单元。自适应阵系统的主要组成单元是:传感器阵、方向图形成网络和自适应处理器(自适应方向图控制器)。自适应处理器是用来调整方向图形成网络中的可变加权系数的。自适应处理器可进一步方便地划分为信号处理器和自适应算法控制器两部分。这些部件实际运行的方式取决于阵在其中工作的传播媒质,有用的频谱,以及使用者关于信号环境的知识等。

传感器阵本身是由 N 个传感器组成,设计它用来接收所在传播媒质中的所需信号(或向所在传播媒质发射信号)。应恰当配置各传感器,使之对一定的空间区域提供适当的覆盖(方向图增益)。自适应阵系统的最终功能,基本上要受所选的各传感器及其几何

图1.1 N 元自适应阵的功能框图

配置的约束。 N 元的输出被送到方向图形成网络，在这里每一阵元输出分别乘以复权系数（包括幅度和相位），然后把全部加权后的传感器输出相加，便得到自适应阵的总输出信号。方向图形成网络中的各加权值（连同各传感器单元及其几何布置），决定了自适应阵的总体灵敏度方向图，形成阵总体方向图的能力又转而决定了在给定信号环境下所规定的系统要求能够怎样好地实现。

自适应处理器的细致结构紧密地依赖于现行信号环境可供用于阵的具体信息。随着有关信号环境的先验信息量（例如，所需信号的方向、干扰功率电平）减少，为自适应处理器选定的自适应控制算法获得成功的可能性便变得趋向于临界。如果已知全部存在信号的准确性质，如果已知相对于阵的信号方向以及传感器本身的特性，那就完全不需要自适应处理器了，针对如此给定的信号环境通过直截了当的计算便可确定方向图形成网络应当怎样调整以增强接收与（或）抑制干扰。当然实际上并不具备这样详尽具体的先验信息，所以自适应处理器必须能够对存在着的不论何种信号环境（在很宽的范围内）自动地发生反应。倘若已知任何信号环境限度或者能够合理地加以分析，那么在确定自适应处理器应取何种形式当中这种限度可以证明会是很有用处的。

1.4 自适应阵问题概述

自适应阵设计人员所面对的问题，是在不需要的干扰信号背景下改善某所需信号的接收状况。“所需信号”和“干扰信号”这两个术语，指的是其特性在某方面不同的两类信号，正是利用这种不同来改进所需信号的接收状况。譬如，倘若已知所需信号的传来方向（或者可以找到这个方向），来自其它方向的任何信号便可通过把阵方向图的零陷对准这些方向来加以抑制。相仿，倘若已知所需信号占据某段频谱，位于该段需要频谱之

外的干扰信号便可通过设备的带通滤波作用来加以排除。由于对所需信号必须了解得足够以便可能把它同干扰信号区别开来,所以可以合理地假定所需信号的性质已知,即使某些信号参量(如传来方向、幅度和相位等)可能要估计也罢。如果设计人员仅需考虑抑制干扰信号,所接收的所需信号就亦可经受一些衰减。同样,如果仅需考虑加强接收所需信号,所接收的干扰信号就亦允许变大。所以加强接收所需信号又抑制干扰信号这双重目标(有时二者是矛盾的),必须妥善解决,以改善所需信号总的接收性能。许多情况下,总接收性能可用输出SNR最好地予以量度。然而,对于无源传感器系统^①,其基本问题是确定在外噪声和干扰信号背景下所需信号是否存在。那么,确定信号存在或者不存在需要判决,简单地使SNR最大是不能够提供这种判决的。是统计判决理论提供了这类问题的解决办法,该理论可使错误判决的危险性减到最小。由统计判决理论确定的最优化处理器,同由使输出SNR最大所得到的最优化处理器,有着密切的关系。所以乍看起来很不相同的问题本质上属于一个统一的问题。

为了使所需信号总的接收性能取得最大的实际改进,自适应阵设计人员必须选择好传感器阵的构形、方向图形成网络实施方案、信号处理器和自适应加权控制算法等,使得系统尽可能既简单又价廉地满足几个不同性能的要求。系统性能要求,可以方便地分为暂态响应和稳态响应两类。暂态响应时间是自适应阵成功地调整从其开始运行到达到满足稳定状态条件所需要的时间,或者是自适应阵在信号环境发生变化后成功地调整所需要的时间。稳态响应是自适应阵达到满足稳态条件的状态。通常采用几个稳态量度,包括总方向图和输出信/噪声比等。在第三章里要详细地讨论几个通用的性能量度。自适应阵系统的响应速率以很复杂的方式依赖于控制的类型、所选定的控制算法和所处信号环境的性质。阵稳态响应不难通过复加权系数、信号环境和传感器结构加以计算。

在非平稳噪声场的变化速率和自适应系统的稳态性能之间存在着一个基本的矛盾:一般说来,噪声环境变化越慢,自适应系统的稳态性能就越良。因此,设计任何自适应系统应当在自适应速率和自适应精度之间寻求最优化的折衷。

系统要求给出暂态响应速率可允许范围的极限。例如,在机载通信系统中,最快的响应速率受信号调制率的限制(因为倘使响应太快,自适应加权要影响所需信号的调制状况)。最慢的响应速率则取决于自适应阵必须响应足够快以补偿飞机的高速运动。

自适应阵的诸加权系数可以用各种算法中的一种加以控制,其中一些算法既可用模拟方式又可用数字方式执行之。另一些则必须用数字方式执行,因而需要至少一台小型数字计算机。为给定用途挑选一个“最好的”算法,这取决于许多因素,其中包括信号结构、可用于自适应处理器的先验信息、要最优化的性能特性、处理器响应的要求速率、可允许的电路复杂性、器件或其它技术限制以及经济效益等。许多实用的通信系统,模拟实现方法似乎优于数字实现方法,因为前者的响应速率快得多,造价也较低。而且,在足够高的数据率下,许多通信系统的数字算法所需宽带信号的模-数转换是不可行的。不过,若所需数据率足够低,数量级为每秒1兆比特或更低,例如声纳阵,则数字实现方法可能是更好的。

参看图1.1,要接收的信号投射到传感器阵上,以不同的时间达到每一个传感器,这

① 这里所谓无源传感器指的是它仅接收外来信号,而不向外空间发射信号。——译注

个时间决定于信号传来方向和各传感器的间距。许多用途的接收信号是一个被调制的载波，其载信息的成份仅是复包络。若用 $s(t)$ 表示已调制载波信号，通常就用 $\tilde{s}(t)$ 表示 $s(t)$ 的复包络（如附录 B 中所叙述的），传输信息的便是这个物理量。然而，更简单的办法是用其复包络来代表所有信号，这样一来公共载波因子就不再在公式中出现，而可不采用复包络符号。由此可见， N 路信号的每一路 $x_k(t)$ ，是代表传感器阵单元输出的复包络，它包含信号和噪声两部分，即

$$x_k(t) = s_k(t) + n_k(t), \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1.1)$$

假设阵是等间距单元的传感器直线阵，又设传播条件是理想的，则 $s_k(t)$ 决定于所需信号传来方向。例如，若所需信号方向是对直线阵法线呈 θ 角，则有（对窄带信号而言）

$$s_k(t) = s(t) \exp \left\{ j \frac{2\pi k d}{\lambda} \sin \theta \right\} \quad (1.2)$$

式中 d ——单元间距， λ ——入射平面波前的波长，已设各个传感器完全相同。

如图 1.1 的方向图形成网络，其自适应阵输出信号可写为

$$y(t) = \sum_{k=1}^N w_k x_k(t) \quad (1.3)$$

式 (1.3) 可便利地表述为矩阵形式，即

$$y(t) = \mathbf{w}^T \mathbf{x} = \mathbf{x}^T \mathbf{w} \quad (1.4)$$

式中上标 T 指示转置，矢量 $\mathbf{w}$ 和 $\mathbf{x}$ 由下列式子给出：

$$\mathbf{w}^T = [w_1 w_2 \dots w_N] \quad (1.5)$$

$$\mathbf{x}^T = [x_1 x_2 \dots x_N] \quad (1.6)$$

全书都用黑正体小写拉丁字母（例如 $\mathbf{a}$ ）表示矢量，用黑正体大写拉丁字母符号（例如 $\mathbf{A}$ ）表示矩阵。

自适应处理器所面临的问题，是选择方向图形成网络中的复权系数 w_k ，而使某项性能能量度最优化。指导自适应处理器运行的性能准则必须选得能够反映所考虑的稳态性能特性。已经采用的最通用的性能能量度包括均方误差^[9,24~27]、SNR^[6,14,28~30]、输出噪声功率^[31]、阵增益^[32,33]、信号畸变^[34,35]以及这些量度在加进性能指数的各种约束条件下的变型^[16,36~39]。在第三章里，所选性能能量度是利用信号特性式 (1.1)~(1.4) 导出算式的。已经找到确定复权矢量最优选择和性能能量度相应最优值的解。人们发现，在确定自适应阵运行得怎样可能地良好当中，阵所处的信号环境起着关键性的作用，而信号环境描述中则隐含着传感器阵构形的效应。阵的构形对于系统性能会有重要的影响，所以在用隐含这种影响的公式进行分析之前，直接考虑传感器间距效应便很有意义。在第二章里要讲述关于阵构形的种种考虑。

1.5 目前采用自适应阵的几种技术

现今，虽然占压倒多数的自适应阵系统的设计是用于通信、雷达和声纳这三种系统的，但是所使用的自适应阵技术所包含的一些特殊点，却是射电天文、地震探测和超声等技术系统所共同具有的。为使读者对这些实用系统有一个概念，我们来简要地叙述一下雷达系统和声纳系统的原理^[40]。有源雷达系统和有源声纳系统，都是用发射信号遇到目标的反射回波来测定目标。所以毫不奇怪，用于设计雷达系统的基本原理亦可同样

用于设计声纳系统^[41]。

任何回波测距系统，其最大探测距离 $R_{\max}$ 决定于周期脉冲的最小周期 $T_{\min}$ 〔亦即决定于脉冲重复频率（PRF）〕，关系式为

$$T_{\min} = \frac{2R_{\max}}{v} \quad (1.7)$$

式中 v ——发射信号的传播速度。

就水下声纳系统而言，水中声速随着温度的变化而有较大的变化，粗略计算时可以用标称值 1500m/s ^[42]。大气中电磁波传播速度可近似取为真空中光速 $3 \times 10^8\text{m/s}$ 。

两个目标间的距离分辨率假设为 r_d ，在无脉冲压缩的情形下，最大脉冲宽度

$$t_{\max} = \frac{2r_d}{v} \quad (1.8)$$

应注意， r_d 也就是“盲距”，在盲距内不可能探测到目标。由于信号带宽 $\approx 1/\text{脉冲宽度}$ ，可见距离分辨率也决定着发射器-接收器及连带电路顺利运行所需的带宽。

信号脉冲是一脉冲序列，其中每个脉冲调制一个载波频率，如图 1.2 所示。载波频率 f_0 定出传播波前的波长 λ_0 ，其关系为

$$\lambda_0 = \frac{v}{f_0} \quad (1.9)$$

声纳系统通常使用 $100 \sim 100000\text{Hz}$ 的频率^[42]，雷达系统的频率则从几兆赫到光频和紫外频率，但绝大多数雷达设备是按微波波段设计的，其频率范围为 $1 \sim 40\text{GHz}$ 。传播波前的波长之所以重要是由于在确定阵方向图中阵单元间距同波长之比是一个重要参量。

1.5.1 雷达技术

无论军用还是民用，都要求雷达系统不断改进性能、扩大功能。现代雷达技术的应用范围很广，我们只可能扼要地叙述其主要应用。军用雷达可以一个系统具备好几种功能，要是在过去每个功能就需要一部雷达。例如，一部火炮控制雷达，要搜索广大空域，要检测和跟踪从很低到很高高度的高速和低速目标，要控制射击飞机和射击地面（或海面）目标的导弹和火炮，还要完成导航和侦察任务。现代民用航空部门需要空中交通管制系统，防撞设施，仪表着陆系统，气象传感器，以及导航台等。雷达技术在实施技术法规、管制交通运输和勘探地球资源等方面的应用正开始达到可观的规模^[43]。

由于性能改进且功能灵活，现代雷达系统变得十分复杂。设备越复杂就要求设计雷达系统时在功能选择上既便利又有效。可靠价廉的数字微电子电路的出现，使得有可能采用数字分系统提供信号处理、判决功能和控制功能的电路，不过，在几年以前这些都还被认为是不切实际和造价太高的。尽管现代雷达系统的特点往往是既先进又复杂，但仍可方便地认为它是由几个方块组成，在系统运行中每个方块各完成其一定的功能。由五个方块组成的数字控制雷达系统的简化框图，如图 1.3 所示。表 1.1 列出图中五个主要方块及其功能^[43]：

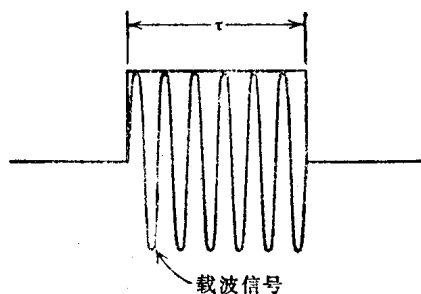


图1.2 脉冲调制的载波信号

表1.1 图1.3中五个方块及其功能

方 块	功 能
发射机	产生射频(R.F.)高功率信号波形。
天线	决定发射波束和接收波束的指向和形状。
接收机	提供频率变换和低噪声放大。
信号处理器	提供目标检测、目标和回波跟踪以及目标轨道估计。
显示器	把处理过的信号变换为有意义的显示信号。

同本书讨论对象有关的主要是天线、接收机和信号处理器这三个方块，现在针对其中每一个方块简要讨论如下。

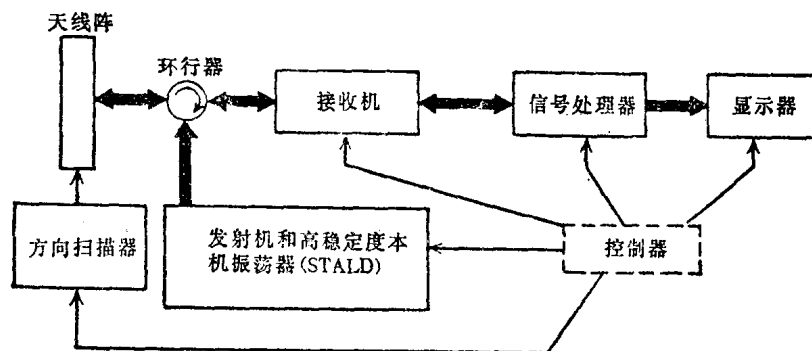


图1.3 典型雷达系统的简化框图

1. 辐射单元和天线阵

现代雷达系统所使用的频率在很宽的范围内，发射的功率也大小不等，这些使得它需要采用各种型式的辐射器单元，从大型抛物面天线到相当小的喇叭、简单电偶极子、双三角片天线(bow-tie antenna)、多圈环^[44]、螺旋天线^[45]、对数周期辐射器^[46]等。大天线口面产生窄的波束宽度，这对远距离探测和高分辨率都是必需的，若要分辨两个靠近的目标就需要雷达系统具有很高的分辨率。绝大多数雷达系统都是使用微波频率，这是由于天线口面的几何尺寸比较小(但电尺寸即以波长计的尺寸很大)而较易得到的缘故。

雷达系统所用天线的型式通常选得不同于通信系统所用天线的型式。雷达系统绝大多数采用可以扫描的赋形定向方向图波束，绝大多数通信系统则要求设计天线波束实现全向覆盖或进行点对点通信。早期雷达站(在第二次世界大战中研制的)使用甚高频(VHF)段和超高频(UHF)段，并采用天线阵。另一方面，微波频率雷达系统广泛采用抛物反射面天线，也有采用微波透镜天线的。机载雷达系统中，共形天线阵和表面波天线是很有用的，因为这样的天线结构不露出飞机表面。

天线阵在基本原理上不同于透镜天线和反射面型天线。在透镜天线和反射面型天线中，离开馈源的发射波前的形状是球面，球面波被透镜和反射面变换为平面波。在天线阵中，在辐射之前就把适当的相位关系赋予信号，所以辐射波前任何时候都呈平面状。用于雷达系统的天线阵的两种最普通的形式，是直线阵和平面阵。

直线阵简单地就是诸天线阵元布置在一条直线上。平面阵则是一个二维阵，诸天线阵元被布置在一个平面上。直线阵通常用于产生扇形波束，如果要求一个平面内为宽波束，正交平面内为窄波束，扇形波束便很有用。雷达系统经常采用平面阵，因为在所有天线型式中心平面阵是最多能的。扇形波束不难用矩形口面获得。针形波束则不难用正方形口面或圆形口面来获得。利用同一个天线口面，采用适当加权的办法，一个阵可以同时产生多个搜索波束与（或）跟踪波束。对于雷达系统来讲，天线阵有许多单个受控单元，这在设计上就很灵活，使得它很受欢迎（虽然结构复杂、造价昂贵）。价格低廉的数字式控制元（器）件的出现，以及部分自适应控制概念可能付诸实用^[47~49]，可能会很快地大幅度降低天线阵信号处理和控制设备的造价。

为实现阵波束扫描，要求给每个阵元提供适当的相移。相移器件有下列几种：（1）固定相移器，（2）机械可调相移器，（3）电调相移器^[50]（已用在现代先进系统中）。构造微波频率相移器可以应用铁氧体材料、PIN二极管、气体放电管，或行波管等^[51]。

天线阵可以做得非常紧凑，适合于用在舰船上^[52]。参考文献[53]描述的、由80个波导喇叭组成的旋转直线阵天线，就是一个例子。第二次世界大战中使用过一部叫做FH MUSA的微波雷达，它的天线是一个平面阵，利用相移器使波束转向^[54,55]。另一部电扫描阵雷达的例子，是ESAR，它的天线是一个 $50 \times 0.093\text{m}^2$ 平面阵，单元超过8000个，电扫描系采用频率变换相控线路^[56]实现的。

2. 接收机

在雷达接收机设计中，接收机噪声及其消除是最重要的考虑因素。因此，接收机通常是基于线性部分，使SNR最大来进行设计。这一原则使得接收机是根据把它当作匹配滤波器或当作交叉相关器的理论进行设计。雷达系统使用过各种型式的接收机，包括超外差接收机、超再生接收机、晶体视频接收机、调谐射频（TRF）接收机等^[56]。最流行的接收机是超外差接收机，机器必须简单、紧凑的场合，这种接收机最合适^[56]。接收信号由天线进入系统，通过环行器送入低噪声RF放大器进行放大。在RF放大以后，信号进入混频器，在这里RF变换为较低的中频（IF）。因为IF较易得到必需的信号增益，并且IF滤波器较易设计，所以增益和滤波是均在IF放大级完成的。

3. 信号处理器

在接收机中实现了SNR最大以后，下一步就要由信号处理器来完成两项基本操作：（1）检测是否存在任何目标；（2）从接收波形抽取信息，获得目标轨迹数据，譬如位置数据和速度数据。检测噪声背景下是否存在信号的问题，是用统计判决方法来解决的。从雷达信号抽取信息的问题，相仿是用参量估计这一统计方法处理的。虽然许多数理统计方法为人们所熟知已经相当一个时候，但是把它们直接应用于雷达信号处理问题，在几年以前还被认为是不切实际且价格昂贵的。可靠的、价廉的微电子数字电路技术取得的进展，已经大大改变了现代雷达信号处理电路设计的局面，其结果是相当复杂的处理器，包括很先进的动目标显示（MTI）接收机和流程快速傅里叶（Fourier）变换（FFT）处理器，现在都已在应用之中^[57]。由于数字技术的进步，现在已惯常利用一些基本功能数字器件，包括使用双极视频通道的同相/正交相处理器，用于MTI、脉冲多卜勒（Doppler）和脉冲波形压缩的相干处理器，以及程序滤波器中的数字发生器等。

现行MTI雷达能够成功地抑制来自地面固定目标的杂乱回波，自适应MTI雷达则能