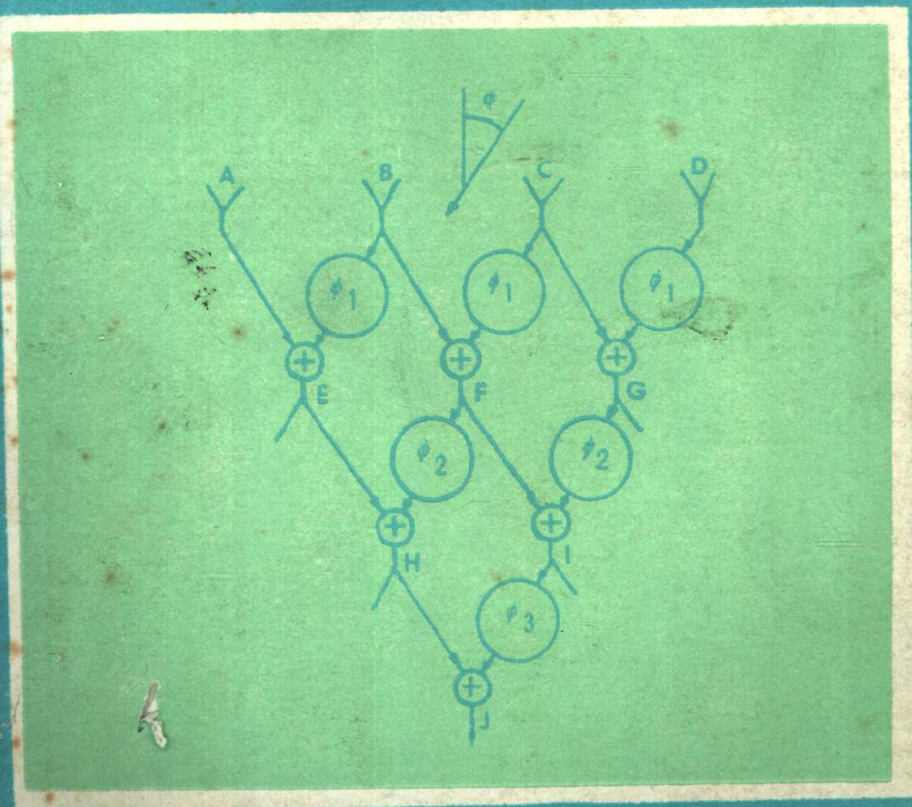


自适应阵列原理

[英] J. E. 赫德森 著

邱文杰 等译 文希理 校



成都电讯工程学院出版社

IEE 电磁波丛书第十一分册

自适应阵列原理

[英] J.E.赫德森 著

邱文杰等 译

文希理 校

成都电讯工程学院出版社

• 1988 •

内 容 提 要

本书着重介绍自适应阵列天线的基本概念、原理、准则和系统方面的知识。主要内容包括:入门概念;矢量和矩阵法;最佳天线及其自适应解和特性;主瓣约束;次最佳阵及其他改进系统。

本书内容新颖,概念清楚,叙述由浅入深,简明扼要,理论联系工程实际。除可作电磁场与微波技术、电子工程、无线电通信等专业的高年级学生和研究生选修课教材外,亦可供从事上述领域工作的有关工程技术人员参考。

自适应阵列原理

[英] J.E.赫德森 著

邱文杰等 译

文 希 理 校

成都电讯工程学院出版社出版

四川省地矿局计算机中心电脑排版

成都市第二十一中学校办印刷厂印刷

四川省新华书店经销

开本 787×1092 1/32 印张 12.25 字数 273千字

版次 1988年12月第一版 印次 1988年12月第一次印刷

印数 1—2500册

中国标准书号: ISBN 7-81016-090-7/TN·27

(15452·57)

定价: 4.00元

译者的话

自适应阵列天线技术是五十年代在电磁学、通信理论、信息论、数字技术、电路和控制论的基础上发展起来的一门综合的新技术。由于它具有自动地适应环境变化而保持阵列特性在某种准则下最佳的能力，方向图“零点”能自动对准干扰方向，主波瓣能指向有用信号方向，并且具有多波束和高分瓣的能力，因而在雷达、通信、遥控遥测、电视接收、地震测报和医疗卫生等领域有着广泛的应用前景。特别是随着现代应用电子技术的纵深发展，自适应阵列天线更受到人们愈来愈大的重视。

近年来，国外有关自适应阵列天线的文章发表很多，仅美国的天线与传播协会会刊(AP)就已编辑出版了三个专刊，并出现了部分实用系统。国内也有不少单位进行研究，但至今没有一本系统介绍自适应阵列天线理论方面的专著。J.E.赫德森写的“自适应阵列原理”是这方面的一本好书，它由浅入深地介绍了自适应阵列天线的基本概念，原理、准则与系统方面的知识。我们结合工作将它翻译出版，希望对从事该领域工作的工程技术人员，高等院校的研究生和高年级学生有所帮助，并对推动我国自适应阵列天线技术的发展起到一定的积极作用。

在本书的翻译过程中，谢处方教授给予了大力支持和帮助，谨此致谢！

本书的序、前言和第一章由邱文杰译，第二、三章由雷玉贤译，第四章由沈丽英译，第五、六、七章和附录由吴为

公译，文希理教授负责全书的统校工作。由于我们水平有限，译文中错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

译 者

1988年5月于成都电讯工程学院

序

电子研究理事会的电波传播、天线和波导委员会，在讨论自适应阵列用于联合王国的电磁学和声学领域的现状时，了解到由于缺少一本向工程师介绍基本概念和数学知识的教科书，给这方面的发展造成一定的障碍。本书的编写部分出自这一考虑，并力图纠正这一不正常的现象，打算使此书同时包含自适应阵列的预备知识，综合运用和数学知识三方面的内容。

预备知识部分是直接为那些已在天线和声纳领域从事工作的人们编写的，并假定他们非常熟悉有关阵列方向图设计的一般工程知识。自适应天线的发展历史，仅见于少量难于得到的防务研究报告中，本书未加叙述，有兴趣的读者可在文献中找到较详细的材料。另外，本书对硬件的设计仅作简单的介绍。

综合运用部分仅讨论基于窄带梯度的自适应阵列。某些重要课题，例如主瓣约束，有限带宽的影响以及多径问题等文献中作了不适当的处理。本书则力图以连贯的和实用的方式讨论这些课题。并且书中少量章节还引入了某些不常见的数学工具，例如伪反演和各种矢量空间法。作者坚信这些方法是最经济的，而且也将是最简的。即使这样，全书内容仍然是丰富的，而对宽带阵列，收敛加速度和谐分析的内容则作了相应的删减。写作本书时，这些研究领域还正在发展之中，建议读者及时阅读有关的杂志并注视今后的发展。

最后，按照哲学的观点看，本书是以数学模型为基础，

而且尽可能得出问题的解。这样一来，的确省略了很多有趣的但难于处理的问题。反之，如果只用模拟法描述待求问题的特性，必然导致解释上的困难，不能改善对问题的理解，同时，除非采用进一步的模拟，所得结果不易推演到另一新的情况。不过，解析法也只是对理想的干扰情况才是有效的，愈接近实际问题、愈逼近实际问题的数学模型，对数值法的要求也就愈高。

本书的编排方式

基本上按教科书编排素材，逐渐增加难度，为的是让读者对自适应课题有一个连续发展的整体观念。在这种情况下，最初阅读时，可以略去 2.5, 2.7, 3.2, 3.5, 3.7, 3.8, 4.9~4.11, 5.3 节和第六章、第七章中的某些数学内容。为了节省篇幅，减少一些对基本定义的阐述，手头最好有一本标准的工程数学教科书^①。

① Krcysig, E.: “近代工程数学”, Wiley.

前 言

J.W.R.格里芬斯教授

阵列是由一组探测器组成，各探测器的输出按一定的方式组合，以便产生所需要的效果，例如，在各个方向“看见”的一组波束。探测器可以是多种形式，例如，声纳的探测器是声学换能器，高频接收时是单极天线，雷达系统中则是微波喇叭。不同的应用对处理方式的要求各异，这其中起主要作用的是技术措施而不是工作原理。目前，人们极为关注能响应未知干扰环境的阵列处理系统。这种系统的基本原理并不新奇，它基本上是靠维纳的滤波器理论，但是，这种理论应用到实际中时却受到工艺技术和缺乏足够快的较完善的实时运算方法的限制。过去十年左右，由于电子元件和计算机技术两个孪生领域有了快速的进展，极大地改变了原有状况，元器件的成本消耗大大降低，使得复杂信号的实时处理成为可能。这样，人们对自适应处理的兴趣日益增长，虽然其主要应用仍在防卫方面，但是，民用的需求也正在增长。因此，有关这一课题文献迅速扩展，已有必要出版一本权威性的著作来阐述自适应阵列的基本原理。

赫德森博士在自适应阵列处理课题方面的重要贡献是众所周知的。他还讲授过许多有关这一课题和相近课题的课程。看来，他是完成这一专著的理想人选。我确信，读者在阅读本书时，将发现作者对所选素材的说明是完美的，叙述也是符合逻辑的。

基本符号和用法一览表

d	单元间距
$d(t)$	参考信号
k	波数, $2\pi/\lambda$
$g(\theta)$	相对一个单元的阵的幅度增益
N	阵的单元数
P	阵的输出功率
Q	输出信号与干扰加噪声的比
SIR	信号干扰比
SNR	信噪比
SNIR	信号与噪声加干扰的比
JNR	干扰与噪声比
LMS	最小均方
PI	功率倒置
t	时间
$y(t)$	阵的输出信号
α	源的方位 (通常相对于边射)
β	归一化的反馈系数
λ	波长, 或本征值 (下标时)
π	阵单元的功率
μ	绝对的反馈系数
θ	与空间频率有关的 $\sin(\alpha)$
ω	时间的角频率

δ_{ij}	$= 1, i = j$ $= 0, i \neq j$
σ^2	方差
ψ	协方差
ρ	$g(\theta)$ 的归一化型式, 或 ψ 的归一化型式
$E(\cdot)$	期望值, 或整体平均值
B	波束形成器矩阵
C	约束矢量
G	梯度矢量
I	恒等式或单位矩阵
M	噪声和干扰的协方差矩阵
P	投影矩阵
R	总的协方差矩阵, 亦即 M 加上 信号的协方差
S	空间矢量
U	本征矢量
W	加权矢量
W_c	W 的一般(同相的)型式
W_{opt}	最佳加权矢量
$X(i)$	阵的输入数据
Λ	对角线矩阵
V	倒三角形; 微分矢量算子
$(\cdot)^t$	简单的转置
$(\cdot)^*$	简单的共轭
$(\cdot)^H$	埃尔米特转置
$(\cdot)^+$	伪反演

目 录

序

前 言

基本符号和用法一览表

第一章 入门概念	(1)
1.1 天线零点的转动	(1)
1.2 电子零点控制	(2)
1.3 约束功率极小值	(6)
1.4 弱信号的自适应	(13)
1.5 旁瓣对消器	(16)
1.6 戴维思波束形成器	(18)
1.7 由 N 个复系数构成多个零点	(23)
第二章 矢量和矩阵法	(34)
2.1 窄带信号	(34)
2.2 窄带信号的表示法	(35)
2.3 矢量的内积	(45)
2.4 矢量间的角度	(48)
2.5 由投影得到正交性	(52)
2.6 输出功率, 协方差矩阵, 二次型	(66)
2.7 两个离散源的协方差矩阵	(73)
2.8 不相干的噪声场	(79)
第三章 最佳天线	(85)
3.1 最佳性的含义	(85)
3.2 最大信噪干扰比(SNIR)的本征解	(86)

3.3 最小均方误差准则	(94)
3.4 控制系统	(101)
3.5 最大检测概率	(110)
3.6 信噪比(SNR)的直接最大值	(112)
3.7 数据的矩阵变换影响	(114)
3.8 功率方向图的最佳化	(118)
第四章 最佳天线的自适应解	(122)
4.1 自适应的意义	(122)
4.2 梯度法	(123)
4.3 一种实时最小均方误差算法	(131)
4.4 控制梯度系统	(139)
4.5 约束功率到最小值	(142)
4.6 一种线性约束算法的硬件设备	(148)
4.7 用来确定梯度的微扰法	(154)
4.8 收敛简化分析	(159)
4.9 连续时间、实数 LMS 算法	(163)
4.10 实数协方差矩阵的本征矢量	(166)
4.11 加权跳变现象	(168)
4.12 量化系数的控制	(183)
4.13 取样矩阵转置	(184)
4.14 对角线法	(192)
第五章 最佳天线的特性	(196)
5.1 最小均方算法——单一信号和干扰	(196)
5.2 病态协方差矩阵的解	(205)
5.3 有限带宽效应	(218)
5.4 极化, 近场散射和 E/H 的差异	(225)
5.5 相关多径效应	(227)

5.6 系数的量化	(230)
5.7 信号的量化	(234)
第六章 主瓣约束	(236)
6.1 引言	(236)
6.2 主瓣凹口的形成	(237)
6.3 主瓣中天线特性的多项展开式	(244)
6.4 线性主瓣约束	(252)
6.5 范数约束最佳解	(267)
6.6 随机通道增益误差	(277)
6.7 范数约束对干扰对消的影响	(281)
6.8 硬件对范数约束的近似	(292)
6.9 数据变换对范数约束的影响	(295)
第七章 次最佳阵及其他改进系统	(297)
7.1 具有稀疏自适应阵元的天线阵	(297)
7.2 线性约束最小输出功率的次最佳系统	(307)
7.3 功率倒置解	(312)
7.4 旁瓣对消器	(320)
7.5 自适应组合控制子阵	(324)
7.6 常规组合的自适应子阵	(327)
7.7 波束空间的次最佳系统	(329)
7.8 次最佳系统的比较	(336)
7.9 仅对幅度或相位加权	(337)
7.10 宽带天线阵	(339)
7.11 非自适应的预处理	(341)
7.12 自适应预处理器	(343)
7.13 次最佳系统的收敛特性	(345)
主要参考文献	(352)

附录 1	基本矢量、矩阵和统计学	(354)
A1.1	基本矢量和矩阵特性	(354)
A1.2	本征矢量的表示	(355)
A1.3	投影	(359)
A1.4	伪反演	(360)
A1.5	对复变量的一些统计期望	(362)
A1.6	随机变量的高阶矩	(364)
附录 2	$W^H R W$ 的求导	(367)
A2.1	实变量情况	(367)
A2.2	复变量情况	(368)
附录 3	投影的最小范数性质	(371)
附录 4	范数约束功率最小值的本征值解	(372)
索引	(374)

第一章 入门概念

1.1 天线零点的转动

在有干扰和噪声的情况下，自适应天线调整其方向图，使得接收机的输出端有最大的信噪比。可以这样说，最简单的自适应天线就是一种有确定方向图的可转动的天线。如果只存在接收机的电路噪声，那只要方向图的主瓣对准需要的信号方向，信噪比就应该最大。因为此时噪声功率保持不变，而信号功率达到最大值。例如，便携式收音机接收微弱信号时的通常取向就是如此。

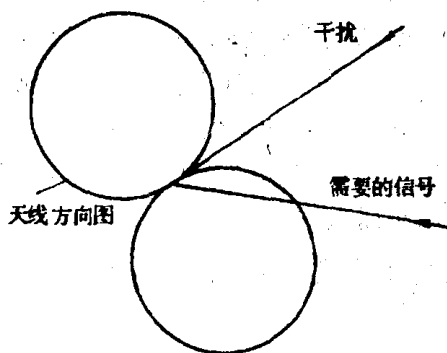


图 1.1.1 干扰存在时信号的接收

但是，同通道干扰有时刚好出现在一个不适当的电平上。假设干扰是由其他方位上的源产生的，只要天线的取向稍微不同，信号与噪声加干扰的比就将最大，特别是当天线方向图的零点指向干扰时，即使在某种程度上减小了需要信

号的绝对功率，将信号与接收机的噪声比降低到无干扰时可得到的信噪比之下，最大的信号与噪声加干扰比也是存在的。这种情况示于图 1.1.1。图中，假设铁氧体棒的典型方向图为 $\cos(\alpha)$ 。

此技术可用便携式收音机调谐到微弱的中波信号，并确定最大信噪比的方位来得到实际验证。将离收音机几米远的电视机开启，使它成为一个方便的干扰源，则会发现：为得到最大的信号干扰比，收音机存在一个十分明显的确定方位。

1.2 电子零点控制

即使对天线采用机械控制来自动完成自适应过程，确定天线的实际方位也并不是特别方便和迅速的。较迅捷灵便的方法是采用多元阵列，在阵列求和之前，对各输出电气上作加权处理，调整加权系数来改变方向图的形状。最简单的情况是图 1.2.1 所示的二元阵，图中，各通道内的移相器能产生所要求的变化。假设阵列单元在感兴趣的水平面内是无方向性的，并且由垂直偶极子组成。在声学情况下，单元可以是压力传感水听器或话筒。

对于从与宽边成 $\theta = \sin(\alpha)$ 方向传来的正弦平面波，相加器的输出为

$$\begin{aligned} y(t) &= e^{j\omega t} [e^{-jk d \theta / 2 - \varphi} + e^{jk d \theta / 2 - \varphi}] \\ &= 2e^{j\omega t} \cos[k d \theta / 2 - \varphi] \end{aligned} \quad (1.2.1)$$

式中 $k = 2\pi / \lambda$ 为波数， d 为单元间距， φ 为移相器引入的相位前置量。如果 d 小于二分之一波长，而 $\varphi = \pi / 2$ ，则阵列在水平面内具有类似于偶极子的方向图，如图 1.2.2 (a)

所示,对于小的 d 值, 方向图可近似为

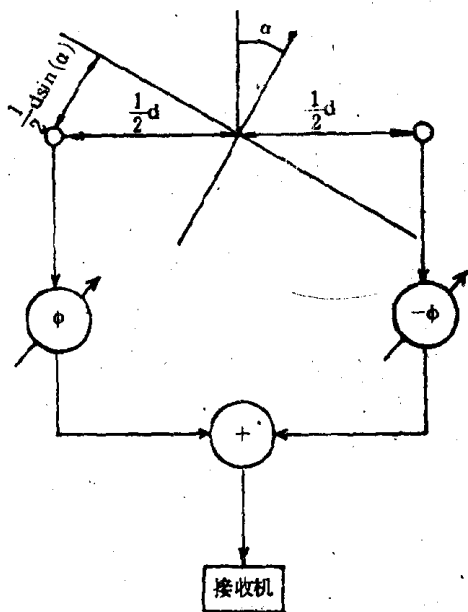


图 1.2.1 具有可控零点的二元阵

$$y(t) = e^{j\omega t} k d \sin(\alpha), \quad \varphi = \frac{\pi}{2} \quad (1.2.2)$$

如果 φ 取为不同于 $\pi/2$ 的相位将方向图的零点调整到不同的方位, 则由式(1.2.1)很容易证明: 如果零点存在, 对于小的 d/λ 值, 零点将出现在相对于宽边的 α 方向, 即

$$k d \sin(\alpha) / 2 - \varphi = \pm \pi / 2 \quad (1.2.3)$$