

*Spatial Adaptive Signal Processing*

# 空间自适应信号处理

汪晋宽 顾德英 著



**NEUPRESS**  
东北大学出版社

# 空间自适应信号处理

汪晋宽 顾德英 著

东北大学出版社

·沈阳·

© 汪晋宽 顾德英 2003

图书在版编目 (CIP) 数据

空间自适应信号处理 / 汪晋宽, 顾德英著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2003.9

ISBN 7-81054-958-8

I. 空… II. 汪… III. 自适应通信系统—信号处理  
IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 101880 号

---

出版者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www.neupress.com

印刷者: 沈阳市政二公司印刷厂

发行者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 140mm×203mm

印 张: 8.125

字 数: 211 千字

出版时间: 2003 年 9 月第 1 版

印刷时间: 2003 年 9 月第 1 次印刷

责任编辑: 任彦斌

责任校对: 李 叶

封面设计: 任 何 唐 人

责任出版: 杨华宁

---

定 价: 24.00 元

## 前 言

信号处理技术是高速发展的信息技术的组成部分。它涉及信息论、控制论、信号的检测与估计、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。空间信号处理伴随着雷达、通信技术的发展而兴起并带动雷达、通信技术不断取得新发展，在推动信息技术的发展和人类文明进步中发挥着重要作用。

近年来，随着大规模集成电路、计算机技术的迅速发展，特别是数学工具高阶量统计和小波变换的新发展，为复杂信号处理提供了有效的手段，使高分辨率和自适应信号处理技术得到完善，引起了国内外诸多学者的关注。作者在多年的研究工作中，获得了大量的经验和成果，尤其是近年在教育部科学技术研究重点项目支持下，我们对空间自适应信号处理的理论和方法进行了进一步系统、深入的研究，并取得了一定的成果。作为阶段总结，我们将这些成果汇总成册，构成本书的主要内容。期望为从事信号处理研究工作的同仁提供帮助，相信即使对信号处理有一定研究的读者，在阅读本书后也将有新的收获。

本书共6章，第1章主要介绍空间信号环境，随机信号的特征、自适应天线阵的最优化处理方法等；第2章介绍自适应天线的基本原理和自适应阵的阵元配置理论，基本自适应算法等；第3章主要介绍卡尔曼滤波方法及应用；第4章介绍小波理论及应用；第5章介绍高阶量的统计特性与应用；第6章介绍空间自适应信号处理的发展趋势。

东北大学的薛延波、刘志刚、宋昕、王晗参加了本书的部分编写工作，薛桂芹、韩英华、贾利琴在文字录入、绘图等方面提供了有益的帮助，东北大学秦皇岛分校在研究设备和资金上提供了资助，在此一并表示感谢。

由于作者水平所限，书中难免有不足之处，恳请诸位专家、同仁和热心的读者批评指正。

编 者

2003年9月

## 目 录

第 1 章 自适应信号处理基础	1
1.1 信号与噪声环境	1
1.1.1 信号模型	2
1.1.2 自适应天线阵的信号描述	4
1.2 随机信号与随机过程	6
1.2.1 随机过程的概率分布函数	6
1.2.2 随机过程的统计特征	8
1.2.3 平稳随机过程	9
1.2.4 高斯随机过程	10
1.2.5 随机信号的相关矩阵	11
1.3 复信号	12
1.3.1 解析信号	12
1.3.2 复向量的修正定义	13
1.3.3 复信号的相关矩阵	15
1.4 自适应天线阵的最优化处理	15
1.4.1 均方误差(MSE)性能量度	16
1.4.2 信噪比(SNR)性能量度	18
1.4.3 似然(LH)性能量度	23
1.4.4 噪声方差(NV)性能量度	24
1.4.5 最优解的因式分解	26
参考文献	28

---

<b>第2章 自适应天线阵列</b> .....	29
2.1 基本工作原理 .....	29
2.1.1 系统的组成 .....	29
2.1.2 自适应阵列处理的基本问题 .....	30
2.2 自适应阵的阵元配置理论 .....	32
2.2.1 二元阵 .....	32
2.2.2 直线阵 .....	35
2.3 自适应阵的阵列特性 .....	38
2.3.1 调节阵响应加强信号接收 .....	38
2.3.2 各种阵效应对零陷的限制 .....	41
2.4 窄带信号处理与宽带信号处理方法 .....	43
2.4.1 窄带信号处理方法 .....	43
2.4.2 宽带信号处理方法 .....	44
2.4.3 多通道宽带信号处理方法 .....	45
2.5 基于梯度的算法 .....	49
2.5.1 最陡下降法 .....	51
2.5.2 最小均方(LMS)算法 .....	56
2.5.3 加速梯度算法 .....	64
2.5.4 微分最陡下降算法(DSD) .....	68
参考文献 .....	71
<b>第3章 卡尔曼滤波方法与应用</b> .....	72
3.1 卡尔曼滤波基础 .....	72
3.2 加权系数静态控制算法 .....	74
3.2.1 静态加权系数卡尔曼滤波的算法 .....	75
3.2.2 收敛于最佳加权系数的收敛条件 .....	77
3.2.3 仿真结果 .....	80

---

3.3 适用于移动通信的卡尔曼滤波算法	85
3.3.1 信号模型	85
3.3.2 动态最佳加权系数的离散时间状态方程	87
3.3.3 信号波与干扰波相关情况下的状态方程	90
3.3.4 动态卡尔曼滤波算法	91
3.3.5 仿真研究	92
3.4 空间卡尔曼滤波在信号到来方向估计中的应用	98
3.4.1 到达波的空间状态方程式	98
3.4.2 扩展卡尔曼滤波	100
3.4.3 入射波到达方向估计	103
3.4.4 仿真及结果	104
参考文献	109
<b>第4章 小波变换理论及应用</b>	<b>112</b>
4.1 子带分解理论	112
4.1.1 子带分解的定义	112
4.1.2 子带分解的优点	114
4.2 小波变换理论基础	124
4.2.1 小波变换理论发展概述	124
4.2.2 小波变换及其性质	129
4.2.3 小波变换与傅里叶变换	132
4.2.4 正交多分辨分析(MRA)和正交小波基的构造	134
4.2.5 小波包	152
4.2.6 Mallat 金字塔算法	154
4.2.7 最优树的裁剪理论	161
4.3 小波包理论对信息理论准则的优化	169



4.3.1	信号数目估计的信息理论准则 .....	170
4.3.2	基于小波包分解的优化算法 .....	171
4.3.3	仿真实验 .....	173
4.3.4	wpMDL 算法的特点 .....	176
4.4	频率估计和 DOA 估计的等价性 .....	176
4.4.1	频率估计模型 .....	177
4.4.2	DOA 估计方法 .....	177
4.4.3	参数估计的等价性 .....	182
4.4.4	仿真实验 .....	183
4.5	阵列信号处理的小波包分解算法 .....	187
4.5.1	基本想法 .....	187
4.5.2	算法描述 .....	187
	参考文献 .....	189
<b>第 5 章</b>	<b>高阶量方法及其应用 .....</b>	<b>193</b>
5.1	高阶统计量 .....	193
5.1.1	特征函数 .....	193
5.1.2	高阶统计量 .....	195
5.1.3	随机过程的高阶累积量 .....	197
5.1.4	高阶累积量性质 .....	198
5.2	高阶累积量张量表示 .....	202
5.2.1	线性空间的张量 .....	203
5.2.2	作为线性应用的张量 .....	207
5.2.3	高阶量的张量表示 .....	209
5.3	高阶方向估计 .....	210
5.3.1	4-MUSIC .....	210
5.3.2	4-ESPRIT .....	213
5.3.3	降维 .....	214

---

5.3.4 对于 DOA 估计的其他方法 .....	218
5.4 四阶盲波束形成器的设计 .....	221
5.4.1 基本模型 .....	221
5.4.2 波束形成算法比较 .....	222
5.4.3 基于高阶量的盲波束形成器的设计 .....	224
5.5 高阶累积量在多径环境中的应用 .....	226
5.5.1 二阶到来方向估计算法 .....	226
5.5.2 四阶到来方向估计算法 .....	232
参考文献 .....	235
<b>第 6 章 阵列信号处理的新发展 .....</b>	<b>238</b>
6.1 基于神经网络的阵列信号处理 .....	238
6.1.1 信号到来角(DOA)估计 .....	238
6.1.2 基于神经网的波束形成 .....	240
6.2 鲁棒性阵列信号处理 .....	243
6.2.1 影响阵列鲁棒性的多种因素 .....	243
6.2.2 几种鲁棒性自适应波束形成算法 .....	244
参考文献 .....	247

2021/12/04

## 第 1 章 自适应信号处理基础

自适应信号处理是信号处理领域的一个学科分支,它在空间域的应用——阵列信号处理在近几十年内得到了迅速发展。目前已广泛应用于通信、雷达、声纳、地震勘探及电子生物学等领域。

空间信号是通过传感器阵来获得的,它由多个独立传感器单元在空间按不同的位置和规则构成。传感器单元既可以用于接收电磁信号,也可以接收海洋中的声纳信号以及其他类型的信号。

自适应天线是由一组空间配置的传感元件联结到一个单通道或多通道的自适应处理器所组成。因而,自适应天线本身是一个空域自适应滤波器。

自适应天线系统的输入信号及其特性,对系统的结构和性能起着重要作用。系统的输入信号可以是确定性信号或随机信号,而在输入信号中常常会混有噪声或干扰信号。在实际的工程应用和研究中,又将信号在频率域分成窄带和宽带两种,窄带信号与宽带信号的处理方法及自适应系统的结构是不同的。本章主要研究窄带信号及其特性、自适应天线阵的信号模型及其最优化处理方法。

### 1.1 信号与噪声环境

研究自适应天线阵信号处理的目的是,旨在改善系统接收某个所需信号的性能,因而必须明确所需信号和干扰信号之间的差异。可用的信号参量有:信号到来方向、幅度、相位、谱特性(频谱及功率谱)、调制特性以及极化特性等。

阵列信号处理系统分为两类,即有源和无源系统。具有发射传感器阵的系统为有源系统,否则称为无源系统。

在雷达系统和声纳系统这样的有源系统中,传感器产生已知的脉冲(或脉冲序列)波,通过传输媒质传播到某个目标后反射,接收机收到的信号会在信号幅度和相位方面受到目标特性的修正,并且是时间和空间的函数。在无源系统中,其所需信号是目标对象(或有意义事件)本身发生的,在许多情况下,它存在于接收的绝大部分时间里。无源系统的基本问题在于从背景噪声中鉴别出所需对象信号。然而,同有源传感器恰好相反,所需信号的传来方向可能事先未知,且要输送的所需信号的有用信息必然在某方面未知。

### 1.1.1 信号模型

对无源系统来讲,目标产生的信号可能来自不同的信号源(譬如船舰发动机噪声、推进器噪声等),信号源是随机的;在通信系统中所接收的未知通信信号,传感器热噪声、环境噪声和干扰信号源,也都是随机的。因而,应用统计学的中心极限定理,可合成噪声信号的数学模型为高斯(Gauss)随机过程(通常是平稳高斯随机过程)。高斯信号的统计学性质特别有利于分析计算,因为高斯随机过程的一阶矩和二阶矩可以给出这种随机信号的全部信息特征。

由  $N$  个传感器组成的自适应天线接收阵,它所接收的信号波形对应  $N$  个输出  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)$ 。用信号向量  $X(t)$  表示

$$X(t) \triangleq \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_N(t) \end{bmatrix}, \quad 0 \leq t \leq T \quad (1-1-1)$$

式中  $t$  的范围为观测时间间隔。接收信号向量中的所需信号成分记为  $S(t)$ , 噪声成分记为  $N(t)$ 。则接收信号向量

$$X(t) = S(t) + N(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (1-1-2)$$

不管是随机信号还是非随机信号,所需信号向量都可表述为

$$S(t) = \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_N(t) \end{bmatrix}, \quad 0 \leq t \leq T \quad (1-1-3)$$

设空间某点信号源为  $s(t)$ , 则有  $N$  个传感器单元的阵响应向量为

$$S(t) = \int h(t - \tau) s(\tau) d\tau \quad (1-1-4)$$

式中  $h(t)$  的第  $i$  个分量  $h_i(t)$  表示从信号源到第  $i$  个传感器的传播效应和第  $i$  个传感器的响应。在理想情况下,  $h_i(t)$  就是时间延迟  $\delta(t - \tau_i)$ 。这样, 每一传感器单元的所需信号分量除了时间延迟不同外其余都相同, 于是式(1-1-3)可表达为

$$S(t) = \begin{bmatrix} s(t - \tau_1) \\ s(t - \tau_2) \\ \vdots \\ s(t - \tau_N) \end{bmatrix} \quad (1-1-5)$$

考虑一个很有实际意义的情况, 当所需信号是如图 1-1-1 所示的从  $\alpha$  方向传来的平面波 ( $\alpha$  是一个单位向量) 时, 诸时间延迟可简单地写为

$$\tau_i = \frac{\alpha \cdot r_i}{v} \quad (1-1-6)$$

式中  $v$  为传播速度。每个传感器的坐标由向量  $r_i$  给出,  $\alpha \cdot r_i$  表示点积

$$\alpha \cdot r_i \triangleq \alpha^T r_i \quad (1-1-7)$$

式中  $T$  表示转置。

由每个传感器单元测量的相对时间延迟可以确定所需信号  $s(t)$  的传来方向, 因而平面波传播效应在决定阵响应的性质方面起着主要作用。由式(1-1-5)和(1-1-7)确定的相对时间延迟, 不但适用于

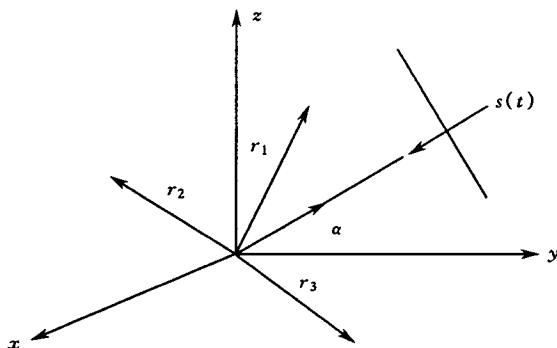


图 1-1-1 三维阵、信号为平面波

非随机信号,而且也适用于具有平面波传播特性的任何信号。

### 1.1.2 自适应天线阵的信号描述

在不同的应用场合和条件下,自适应天线阵有两种不同的结构。即图 1-1-2 的常规阵和图 1-1-3 的信号整相阵。在所需信号传来方向事先已知,且此信息可用来使每一通道中的所需信号在时间上一致,应采用信号整相阵。信号整相阵结构的一大优点,就是可以独立地确定一组处理器的权系数,而与所需信号的时间结构无关。

图 1-1-2 和图 1-1-3 的阵的输出可分别表示为

$$\begin{aligned} y(t) &= \mathbf{W}^H \mathbf{X}(t) \\ y(t) &= \mathbf{W}^H \mathbf{Z}(t) \end{aligned} \quad (1-1-8)$$

式中,  $\mathbf{X}(t) = \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t)$ , 代表接收信号向量,为复信号。噪声向量  $\mathbf{N}(t)$  可假定为平稳、各态历经随机过程,既有有向噪声成分,又有热噪声成分,并同所需信号不相关。信号向量  $\mathbf{S}(t)$  则是由单一有向信号源在阵的各传感器单元上感生的,设信号源

$$s(t) = \sqrt{S} e^{j\omega_0 t} \quad (1-1-9)$$

式中  $\omega_0$ ——载波角频率；

$S$ ——信号功率。

假设所有天线单元是相同的，则每一阵元的信号分量对第一个阵元的信号分量仅差一个相移，此相移决定于信号传到该阵元的波程差。因此信号向量  $\mathbf{S}(t)$  可写为

$$\mathbf{S}^T(t) = [\sqrt{S}e^{j\omega_0 t}, \sqrt{S}e^{j\omega_0 t + \theta_1}, \dots, \sqrt{S}e^{j\omega_0 t + \theta_{N-1}}] = s(t) \mathbf{V}^T \quad (1-1-10)$$

式中  $\mathbf{V}$ ——阵传播向量，即

$$\mathbf{V}^T = [1, e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_{N-1}}] \quad (1-1-11)$$

故图 1-1-2 的常规阵的接收信号向量可写为

$$\mathbf{X}(t) = s(t) \mathbf{V}^T + \mathbf{N}(t) \quad (1-1-12)$$

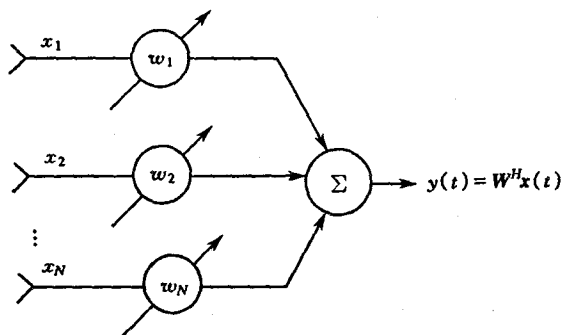


图 1-1-2 常规窄带阵

图 1-1-3 的信号整相阵接收信号向量(时延单元或相移单元后的)可写为

$$\mathbf{Z}(t) = s(t) \mathbf{I} + \mathbf{N}'(t) \quad (1-1-13)$$

现在式(1-1-12)中的  $\mathbf{V}$  已用  $\mathbf{I} = (11 \dots 1)^T$  代替，因为每一通道中所需信号项在时间上已校正，所以都相同。噪声向量部分则变

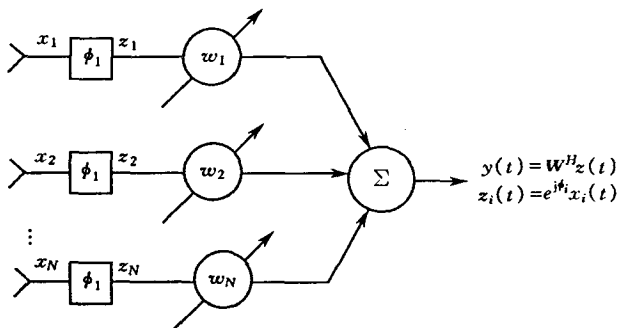


图 1-1-3 信号整相窄带阵

为

$$N'_i(t) = N_i(t)e^{j\phi_i} \quad (1-1-14)$$

## 1.2 随机信号与随机过程

随机信号一般无法用确定函数形式解析表示。因此随机信号在各时间点上的取值以及在不同点上取值之间的相互关联性只能用其概率特性或统计平均特性来表征,它的确定值是无法先验表达的;一个平稳随机信号在各频率点上能量的取值可以用功率谱密度函数与自相关函数统计描述。如果已完全知道了随机信号的概率分布(包括一维概率和 multidimensional 概率分布),就可认为对这个随机信号在统计意义上已被充分了解或已做描述了。而随机过程的各种统计特征分别从不同的侧面间接地反映了随机过程的概率分布特性。

### 1.2.1 随机过程的概率分布函数

随机过程在任意时刻的状态是随机变量,由此可以利用随机变量的统计描述方法来描述随机过程的统计特性。



设  $x(t)$  是一随机过程, 对于每一个固定的  $t_1 \in T$ ,  $x(t_1)$  是一个随机变量, 它的一维概率分布函数为

$$F_1(x_1, t_1) = P\{x(t_1) \leq x_1\} \quad (1-2-1)$$

如果存在二元函数  $f_1(x_1, t_1)$ , 使

$$F_1(x_1, t_1) = \int_{-\infty}^{x_1} f_1(x_1, t_1) dx_1 \quad (1-2-2)$$

成立, 则称  $f_1(x_1, t_1)$  为随机过程  $x(t)$  的一维概率密度。

为了描述随机过程  $x(t)$  在任意两个时刻  $t_1$  和  $t_2$  状态之间的联系, 引入二维随机变量  $(x(t_1), x(t_2))$  的分布函数, 它依赖于  $t_1$  和  $t_2$ , 随机过程的二维分布函数为

$$F_2(x_1, x_2; t_1, t_2) = P\{x(t_1) \leq x_1, x(t_2) \leq x_2\} \quad (1-2-3)$$

如果存在二元函数  $f_2(x_1, x_2; t_1, t_2)$ , 使

$$F_2(x_1, x_2; t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{x_1} \int_{-\infty}^{x_2} f_2(x_1, x_2; t_1, t_2) dx_2 dx_1 \quad (1-2-4)$$

成立, 则称  $f_2(x_1, x_2; t_1, t_2)$  为随机过程  $x(t)$  的二维概率密度。

当时间  $t$  取任意  $n$  个数值  $t_1, t_2, \dots, t_n$  时, 随机过程  $x(t)$  的  $n$  维分布函数就是  $n$  维随机变量  $(x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_n))$  的分布函数, 记为

$$F_n(x_1, \dots, x_n; t_1, \dots, t_n) = P\{x(t_1) \leq x_1, \dots, x(t_n) \leq x_n\} \quad (1-2-5)$$

如果存在函数  $f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n)$ , 使

$$F_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n) = \int_{-\infty}^{x_1} \int_{-\infty}^{x_2} \dots \int_{-\infty}^{x_n} f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n) dx_n \dots dx_2 dx_1 \quad (1-2-6)$$

成立, 则称  $f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; t_1, t_2, \dots, t_n)$  为随机过程  $x(t)$  的  $n$  维概率密度。