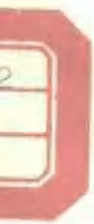


· 自适应天线 ·

自适应天线原理

ZISHIYING
TIANXIAN
CONGSHU



石镇 著

3.4562

1977

1

DG 46/07
自适应天线丛书

自适应天线原理

石 镇 著



国防工业出版社

311000

内 容 简 介

为了更结合我国的实际情况推广自适应理论，作者特在自己研究总结的基础上编写了本书。

全书包括5章，即传统天线、预备知识、主波束自适应控制、方向图零点自适应控制、自适应滤波的几种简单算法。

这是自适应天线丛书的第一册，随后的3册是：空间谱估计、自适应天线算法、自适应天线硬件与软件。

*

自适应天线丛书 自适应天线原理

石 镇 著
责任编辑 刁新媛

*

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路26号)

(邮政编码100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/32 印张6⁵/₈ 145千字

1991年1月第一版 1991年1月第一次印刷 印数：1—2500册

ISBN 7-118-00644-0/TW-115 定价：4.85元

前 言

自适应天线在国外已经发展了将近 30 年。理论和实践均表明，它是天线发展的新方向。这一理论使天线从过去基本上属于场的领域走向了场路结合的新阶段，使天线由传感器件转化为空域信号处理器件，使天线与信号处理、自动控制、计算机、信息论和微电子技术相结合，从而走出了一条新的发展道路。作者从 1977 年开始从事这一领域的工作，已经取得了初步成果。80 年代初国外开始有了这方面的专著，诸如自适应阵列、自适应信号处理、自适应滤波、自适应检测等方面的专著。为了推进这方面的工作，作者与沈铁汉教授、梁福生高级工程师合译了国际上第一本专著“*The Introduction to Adaptive Arrays*”。但该书并不太适合国内广大读者，为此作者基于自己在自适应方面十余年的工作和研究生教学经验，编写了本书。希望它能对有志于自适应天线的同行有些益处。为了使读者逐步掌握这方面的知识并逐步推动研究工作，此册书将致力于自适应天线的基本概念和概念介绍以期入门。作者在今后几年内还将陆续编写后面几册，以便读者在基本概念掌握之后，能从实际、理论、新发展各层次上不断深入。本系列丛书共 4 册，它们是：自适应天线原理；空间谱估计；自适应天线算法；自适应天线硬件与软件。

目 录

| | |
|----------------------------|----|
| 第一章 传统天线 | I |
| § 1.1 天线的功能与性能 | 1 |
| § 1.2 天线元 天线与天线阵 | 3 |
| § 1.3 天线方向性分析与综合 | 7 |
| § 1.4 天线方向性控制与优化 | 11 |
| § 1.5 传统天线存在的问题 | 16 |
| § 1.6 自适应天线的出现与发展 | 18 |
| 第二章 预备知识 | 21 |
| § 2.1 接收阵列 | 21 |
| § 2.2 信号 | 25 |
| § 2.3 复数表示 | 27 |
| § 2.4 信号分析 | 31 |
| § 2.5 随机信号与随机序列 | 34 |
| § 2.6 信号的相关性 (correlation) | 44 |
| § 2.7 信号的相干 (coherent) 性 | 49 |
| § 2.8 阵列处理系统 | 52 |
| § 2.9 阵列响应的协方差矩阵 | 62 |
| 第三章 主波束自适应控制 | 79 |
| § 3.1 主波束优化的加权向量 | 80 |
| § 3.2 主波束方向性增益 | 82 |
| § 3.3 最大信噪比准则 | 90 |
| § 3.4 可控移相器 | 92 |
| § 3.5 相位控制方法 | 94 |
| 第四章 方向图零点自适应控制 | 99 |

| | | |
|------------------|-------------------|-----|
| § 4.1 | 正交加权向量 | 99 |
| § 4.2 | 极化正交加权向量 | 104 |
| § 4.3 | 最大信噪比准则 (MSIR) | 108 |
| § 4.4 | 控制律加权下阵列方向性分析 (一) | 112 |
| § 4.5 | 控制律加权下阵列方向性分析 (二) | 118 |
| § 4.6 | 控制律加权下信噪比处理增益 | 122 |
| § 4.7 | 广义最大信噪比准则 | 127 |
| § 4.8 | 误差均方最小准则 (MMSE) | 132 |
| § 4.9 | 最大似然准则 (ML) | 135 |
| § 4.10 | 噪声方差最小准则 (MV) | 136 |
| § 4.11 | 几种准则的比较 | 138 |
| 第五章 自适应滤波的几种简单算法 | | 140 |
| § 5.1 | 均方误差“曲面”与坐标变换 | 140 |
| § 5.2 | 最小均方 (LMS) 算法 | 147 |
| § 5.3 | LMS 算法的理想稳态性能 | 153 |
| § 5.4 | LMS 算法的暂态性能 | 160 |
| § 5.5 | LMS 算法的失调 | 164 |
| § 5.6 | LMS 算法的参考信号 | 169 |
| § 5.7 | 功率反演算法 | 173 |
| § 5.8 | 功率反演算法稳态性能分析 | 178 |
| § 5.9 | 功率反演算法的暂态性能分析 | 190 |
| § 5.10 | 修正的功率反演算法 | 194 |
| § 5.11 | 功率最优算法 | 196 |
| § 5.12 | 功率最优算法的稳态性能 | 199 |

第一章 传统天线

为了使读者能对自适应天线产生和发展的立论有更好的了解，这里首先概括传统天线，以期达到承前启后的目的。对于熟知天线的读者，本章可一扫而过，甚至直接从第二章开始。

§ 1.1 天线的功能与性能

无线电系统都需要天线，它是一个能量转换器件，实现电路—电磁场能量的正（发射）反（接收）变换。

在变换过程中有三个功能和性能：获得或送出最多的功率——阻抗与阻抗匹配；高效率变换——效率与减小损耗；聚集地发射或选择的接收——方向特性。

除以上性能外，天线的极化特性也很重要。极化分线极化、圆极化（左旋或右旋）、椭圆极化（左旋或右旋），还可以相对地面分成铅垂极化与水平极化。

以上性能中方向特性受到人们最大的重视。方向特性的数学表现形式为方向函数，记作 $f(\theta, \varphi)$ ，几何表示为方向图，数量表示有方向性增益、主波束指向 (θ_m, φ_m) 、主波束宽度、边瓣电平（或主边波比）、零向指向等。此外，有时对方向图波束形状也比较关心。

以球坐标系来表述发射天线的场，参看图 1.1。观察点 $P(r, \theta, \varphi)$ ，源点先假定位于坐标原点。观察点场强用

E_p 表示，由于电磁波为横波，所以 E_p 位于与 r 垂直的平面内。略去下标 P ，一般表示为

$$E(\theta, \varphi) = e_\theta E_\theta(\theta, \varphi) + e_\varphi E_\varphi(\theta, \varphi)$$

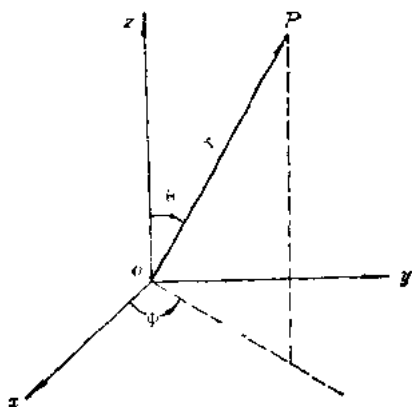


图1.1 发射天线的场的坐标系

式中 e_θ —— θ 增加方向单位向量；

e_φ —— φ 增加方向单位向量；

$E_\theta(\theta, \varphi)$ —— e_θ 方向极化分量；

$E_\varphi(\theta, \varphi)$ —— e_φ 方向极化分量。

另一种表示法为

$$E(\theta, \varphi) = e_\theta KW f_\theta(\theta, \varphi) + e_\varphi KW f_\varphi(\theta, \varphi)$$

式中 $f_\theta(\theta, \varphi)$ 称作 θ 分量方向函数；

$f_\varphi(\theta, \varphi)$ 称作 φ 分量方向函数；

K 为取决于距离、频率和媒质等的常数；

W 为取决于源强的常数。

举例而言，电流元的场为

$$dE(\theta, \varphi) = j \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{dz}{2\lambda r} e^{j\omega t} I_0 e^{-ikr} \sin \theta e_z$$

$$= e_z K_s W_s f_x(\theta) e^{-ikr}$$

式中 $f_x(\theta) = \sin \theta$;
 $W_s = I_0$;

$$K_s = j \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{dz}{2\lambda r} e^{j\omega t};$$

$$\omega = 2\pi f;$$

f —— 频率;

λ —— 波长;

$$k = 2\pi/\lambda;$$

r —— 电流元至观察点距离;

dz —— 电流元长度;

$\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ —— 媒质波阻抗 (μ 为导磁系数, ε 为介电常数);

θ —— 自电流元轴线算起的观察点方向坐标。

§ 1.2 天线元 天线与天线阵

任何一个天线均可看作由许多 (有限多或无限多) 天线元依某种几何形状连续排列 (连续型天线) 或离散排列 (离散型天线) 而成, 天线的发射或接收则看作全部天线元发射或接收的线性合成。

天线组成的基本单元一般可分为电流元、磁流元、口径

元三种类型。线天线可以看作由电流元组成，缝隙天线可以看作由磁流元组成，金属面天线则可看作由口径元组成。

对于连续型天线，上述线性合成以积分形式，即

$$\mathbf{E} = \int d\mathbf{E}$$

而对于离散型天线，则用 Σ 形式，即

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^N \mathbf{E}_i \quad (1.1)$$

天线元、天线、天线阵是相对概念。例如： π 形天线（又名对称振子）可以看作由电流元组成的连续天线阵；引向天线（又名八木天线）可以看作由对称振子（天线元）组成的离散天线阵；引向天线阵可以看作由几个引向天线（天线元）组成的离散天线阵。

由于自适应天线均系离散天线阵，所以本书仅关心离散天线阵。根据

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^N \mathbf{E}_i$$

式中

$$\mathbf{E}_i = [e_\theta f_{i\theta}(\theta, \varphi) + e_\varphi f_{i\varphi}(\theta, \varphi)] W_i K_i e^{-ikr_i} \quad (1.2)$$

$f_{i\theta}(\theta, \varphi)$ 第 i 天线元 θ 分量方向函数；

$f_{i\varphi}(\theta, \varphi)$ 第 i 天线元 φ 分量方向函数。

若

$$\begin{aligned} f_{1\theta}(\theta, \varphi) &= f_{2\theta}(\theta, \varphi) = \dots = f_{N\theta}(\theta, \varphi) \\ &= f_{\theta\theta}(\theta, \varphi) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{1\varphi}(\theta, \varphi) &= f_{2\varphi}(\theta, \varphi) = \dots = f_{N\varphi}(\theta, \varphi) \\ &= f_{\varphi\varphi}(\theta, \varphi) \end{aligned}$$

则称作相似元。通常为了分析简化起见，总是将天线阵看作相似元阵。对于相似元阵有

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \sum_{i=1}^N \mathbf{E}_i \\ &= [\mathbf{e}_0 f_{x_0}(\theta, \varphi) + \mathbf{e}_0 f_{\bar{x}_0}(\theta, \varphi)] \sum_{i=1}^N K_i W_i e^{-ikr_i} \end{aligned} \quad (1.3)$$

式中 r_i 写成

$$r_i = r_0 - \Delta r_i = r_0 - \rho_i \cdot \mathbf{e}_r(\theta, \varphi) \quad (1.4)$$

ρ_i 为第 i 天线元坐标，

r_0 为观察点到原点距离，

$\mathbf{e}_r(\theta, \varphi)$ 为 r 方向单位向量。

令

$$\begin{aligned} K_1 &= K_2 = \dots = K_N = K \\ K_0 &= K e^{-ikr_0} \end{aligned}$$

于是上式化为

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= [\mathbf{e}_0 f_{x_0}(\theta, \varphi) + \mathbf{e}_0 f_{\bar{x}_0}(\theta, \varphi)] K_0 \sum_{i=1}^N \\ &\quad \cdot W_i e^{ik\rho_i \cdot \mathbf{e}_r(\theta, \varphi)} \\ &= K_0 [\mathbf{e}_0 f_{x_0}(\theta, \varphi) + \mathbf{e}_0 f_{\bar{x}_0}(\theta, \varphi)] f_M(\theta, \varphi) \end{aligned} \quad (1.5)$$

式中

$$f_M(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N W_i e^{ik\rho_i \cdot \mathbf{e}_r(\theta, \varphi)} \quad (1.6)$$

可以作如下结论：在相似元条件下，天线（阵）总的方

向函数为天线元方向函数与阵方向函数的乘积，称作方向性乘积定理。特别是一般天线元方向函数是弱变化的，所以天线总的方向函数常用阵方向函数近似。今后我们的注意力放在式 (1.6) 上，并写成

$$f_{\mathbf{m}}(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N W_i e^{jk\rho_i \cdot \mathbf{e}_r(\theta, \varphi)} \quad (1.6a)$$

$$= \sum_{i=1}^N W_i e^{j\beta_i} \quad (1.6b)$$

$$f_{\mathbf{m}}(\theta, \varphi) = \mathbf{w}^T \mathbf{b} \quad (1.6c)$$

式中

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_N \end{bmatrix} \quad (\text{权向量}) \quad (1.7a)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} e^{j\beta_1} \\ e^{j\beta_2} \\ \vdots \\ e^{j\beta_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{jk\rho_1 \cdot \mathbf{e}_r(\theta, \varphi)} \\ e^{jk\rho_2 \cdot \mathbf{e}_r(\theta, \varphi)} \\ \vdots \\ e^{jk\rho_N \cdot \mathbf{e}_r(\theta, \varphi)} \end{bmatrix} \quad (1.7b)$$

上式一般化为如下形式

$$f_{\mathbf{m}}(\theta, \varphi) = \mathcal{F}[w(x, y, z)] \quad (1.8a)$$

式中 \mathcal{F} 表示数学上的变换。式 (1.8a) 表明由权分布可以求得阵方向函数，称作方向性分析问题。反之，有

$$w(x, y, z) = \mathcal{F}^{-1}[f_{\mathbf{m}}(\theta, \varphi)] \quad (1.8b)$$

\mathcal{F}^{-1} 表示数学逆变换，式 (1.8b) 表明由方向函数可以确定权分布，称作方向性综合问题。

§ 1.3 天线方向性分析与综合

传统的天线阵理论回答的便是以上数学变换 \mathcal{F} 和数学逆变换 \mathcal{F}^{-1} 问题,也就是已知权分布来分析天线的方向性,或者给定要求的方向性去综合设计权分布。

下面以离散型等间距直线阵为例来说明方向性分析与综合问题,参看图 1.2。阵列由 N 个元组成,所有天线元沿一条直线排列,相邻元间距为 d ,各元为相似元,各元的权为 w_1, w_2, \dots, w_N (均为复数),于是

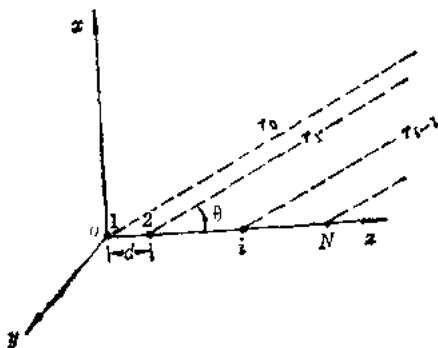


图1.2 等间距直线阵

$$\begin{aligned}
 f(\theta) &= w_1 + w_2 e^{jRd\cos\theta} + \dots + w_i e^{j(i-1)Rd\cos\theta} + \dots \\
 &\quad + w_N e^{j(N-1)Rd\cos\theta} = w_1 + w_2 e^{j\beta(\theta)} + \dots \\
 &\quad + w_i e^{j(i-1)\beta(\theta)} + \dots + w_N e^{j(N-1)\beta(\theta)} \\
 &= \sum_{i=1}^N w_i e^{j(i-1)\beta(\theta)} \quad (1.9)
 \end{aligned}$$

若令

$$\left. \begin{aligned} w'_0 &= w_1/w_1 = 1 \\ w'_1 &= w_2/w_1 \\ &\vdots \\ w'_{N-1} &= w_N/w_1 \\ z &= e^{-jkd \cos \theta} = e^{-j\beta(\theta)} \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

则上式可写成

$$f(\theta) = w_1 \sum_{i=0}^{N-1} w'_i e^{+j i \beta(\theta)} = \sum_{i=0}^{N-1} w'_i z^{-i} \quad (w'_0 = 1) \quad (1.11)$$

上式表明，等间距直线阵方向函数为一级数和，而加权为相应的系数。因为仅关心方向函数相对值，略去 w_1 和上标“/”，于是得到

$$f(\theta) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i z^{-i} \quad (1.12)$$

我们观察以下几种典型情况：

1. $w_0 = w_1 = \dots = w_{N-1} = 1$ (等幅同相情况)

$$f(\theta) = \sum_{i=0}^{N-1} z^{-i} \quad (1.13 a)$$

$$= 1 + e^{jkd(\theta)} + \dots + e^{j(N-1)kd \cos \theta} = \frac{1 - e^{jNkd \cos \theta}}{1 - e^{jkd \cos \theta}}$$

$$= e^{j \frac{N-1}{2} kd \cos \theta} \frac{\sin \left[\frac{N}{2} kd \cos \theta \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} kd \cos \theta \right]} \quad (1.13 b)$$

$$= e^{j \frac{N-1}{2} \beta(\theta)} \frac{\sin \left[\frac{N}{2} \beta(\theta) \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} \beta(\theta) \right]} \quad (1.13 c)$$

$$\cong C(\beta(\theta)) \quad (1.13 d)$$

式 (1.13 a) 称作方向函数的 open form, 式 (1.13 b)、(1.13 c)、(1.13 d) 称作方向函数的 close form。上式绘成图形, 如图 1.3 所示, 具有类似于抽样函数形式。其主波束位于 $\beta(\theta) = 0$ 方向, 该方向上方向函数值为 N , 随着 $\beta(\theta)$ 增加方向函数将减小并出现副瓣。

2. 等幅等相移情况

如果加权为

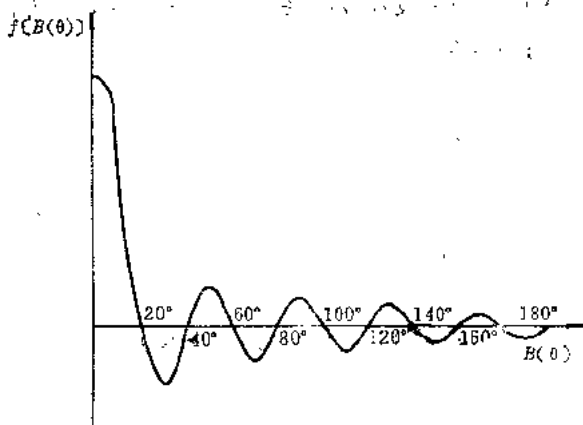


图1.3 $C[B(\theta)]$ 幅值随 $\beta(\theta)$ 的变化曲线

$$\left. \begin{aligned} w_0 &= 1 \\ w_1 &= e^{-j\beta a} \\ &\vdots \\ w_{N-1} &= e^{-j(N-1)\beta a} \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

则

$$\begin{aligned} f(\theta) &= \sum_{i=0}^{N-1} e^{j i \beta a} z^{-i} & (1.15 a) \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} e^{j i (ka \cos \theta - \beta a)} = \sum_{i=0}^{N-1} e^{j i [C\beta(\theta) - \beta a]} \end{aligned}$$

$$= e^{j \frac{N-1}{2} [\beta(\theta) - \beta d]} \frac{\sin \left\{ \frac{N}{2} [\beta(\theta) - \beta d] \right\}}{\sin \left\{ \frac{1}{2} [\beta(\theta) - \beta d] \right\}} \quad (1.15 \text{ b})$$

$$= C[\beta(\theta) - \beta d] \quad (1.15 \text{ c})$$

可以看出，其方向函数具有式 (1.13) 相同形式，只是横坐标发生了平移，即主波束发生在 $\beta(\theta) - \beta d = 0$ 的方向。

3. 不等幅不等相移情况

$$\begin{aligned} f(\theta) &= \sum_{i=0}^{N-1} w_i z^{-i} = \sum_{i=0}^{N-1} w(id) z^{-i} \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} w(id) z^{-i} - \sum_{i=N}^{\infty} w(id) z^{-i} \quad (1.16 \text{ a}) \end{aligned}$$

令

$$w(id) = w(x) \delta(x - id) \quad (1.16 \text{ b})$$

则

$$\sum_{i=0}^{\infty} w(id) z^{-i} = \mathcal{Z}[w(x)] \quad (1.16 \text{ c})$$

$$\sum_{i=N}^{\infty} w(id) z^{-i} = \mathcal{Z}[w(x)U(x - Nd)] \quad (1.16 \text{ d})$$

式中

$$U(x - Nd) = \begin{cases} 1 & \text{当 } x \geq Nd \\ 0 & \text{当 } x < Nd \end{cases} \quad (1.16 \text{ e})$$

为阶跃函数。符号 \mathcal{Z} 表示 z 变换算子，于是

$$f(\theta) = \mathcal{Z}[w(x)] - \mathcal{Z}[w(x)U(x - Nd)] \quad (1.16 \text{ f})$$

