

自适应信号处理技术及其应用

陆 仲 良

摘 要 本文讨论自适应信号处理的基本理论和几种较新的快速算法,以雷达旁瓣对消器、高分辨力测向、自适应雷达信号检测为例,阐明自适应信号处理技术在雷达中的应用。

一、引 言

自适应信号处理技术是六十年代初兴起的^[1,2],经过近二十年的发展已形成比较完整的理论,正走向实际应用阶段。特别是近十年来,微电子技术和计算机技术的迅速发展,大大改变了实时自适应信号处理器实现的可能性,降低了造价。因而在通信、雷达、声纳和地震信息处理中,自适应信号处理技术得到了日益广泛的应用。本文首先讨论自适应信号处理的基本理论,和几种新的快速算法:直接矩阵求逆(DMI)算法、级联去相关(G-S)算法和最大熵谱法(MEM);并以雷达旁瓣对消器、高分辨力测向、自适应雷达信号检测为例,阐明自适应信号处理技术在雷达中的应用。

二、基 本 理 论

自适应信号处理可在空间、时间、频率和极化域中进行。自适应天线旁瓣相消器、自适应噪声相消器,分别为空间域和时间域处理的典型例子。图一为自适应信号处理器的通用模型框图。图中 X 是输入信号矢量,

$$\begin{aligned} X &= [x_1, x_2, \dots, x_N]^T \\ &= S + n \end{aligned}$$

其中 S 为信号矢量, n 为干扰矢量。加权矢量 W 为

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$$

d 为所需信号矢量。输入信号经加权后与所需信号相比较,产生误差信号 ε , ε 和 X 经自适应处理器形成最优权值,使误差信号最小。自适应信号处理器能自动地随着信号和干扰环境的变化改变权值,使信号处理器保持最佳状态。最佳准则很多,下面仅以最小均方误差准则为例来导出最佳权值 W_{opt} 方程。参考图1,误差 ε 为

$$\varepsilon = d - W^T X \quad (1)$$

$$\varepsilon^2 = d^2 - 2dW^T X + W^T X^* X^T W \quad (2)$$

对(2)式取统计平均得

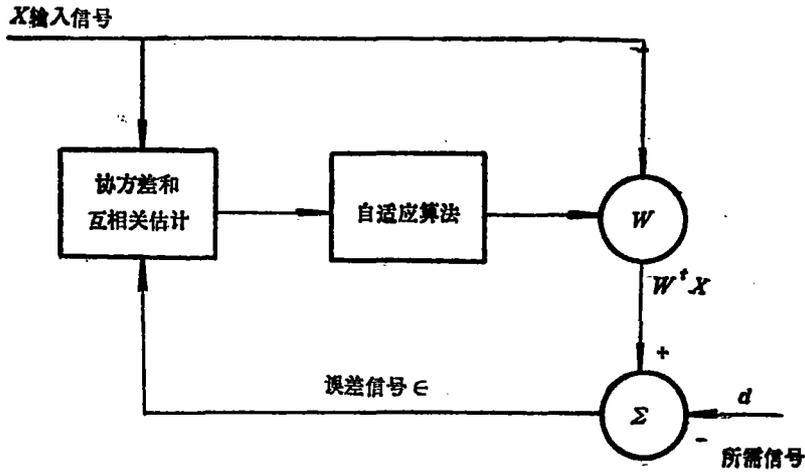


图 1 自适应信号处理器模型

$$E\{e^2\} = E\{d^2\} - 2W^T r_{xd} + W^T R_{xx} W \quad (3)$$

式中

$$R_{xx} = E\{X^* X^T\} \quad (4)$$

$$r_{xd} = E\{X d\} \quad (5)$$

由(3)式看出 $E\{e^2\}$ 是权 W 的二次函数, 存在唯一的极小值, 求解得

$$R_{xx} W_{opt} = r_{xd} \quad (6)$$

若 R_{xx} 的逆存在, 则最佳权 W_{opt} 为

$$W_{opt} = R_{xx}^{-1} r_{xd} \quad (7)$$

这就是熟知的 Weiner-Hopf 解的矢量形式。

求解 W_{opt} 的方法统称自适应算法。近年来, 对快速实时算法研究得多, 主要有直接矩阵求逆(DMI)算法, 级联去相关算法和最大熵谱法等。

直接矩阵求逆(DMI)算法^[3] 由(7)式求 W_{opt} , 直接求 R_{xx} 的逆 R_{xx}^{-1} 。一般说, R_{xx} 是未知的, 可以通过 X 的 K 个样本来估计, 常用的是最大或然估计

$$\hat{R}_{xx} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K X^*(j) X^T(j) \quad (8)$$

$$\hat{r}_{xd} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K X(j) d^*(j) \quad (9)$$

$$\hat{W} = \hat{R}_{xx}^{-1} \hat{r}_{xd} \quad (10)$$

用权估值 \hat{W} 代替 W_{opt} , 当样本数 K 趋于无穷大时 $W(\infty) = W_{opt}$, 一般只要 $2N$ 个样本就可以达到良好的稳态性能, 其瞬态响应时间为几十微秒的量级, 是最快的算法, 但当 N 很大时, 计算机运算量很大。

级联去相关法^[4] 基本思想是将输入信号 X 加到一个网络上, 得到互不相关的方差相等的输出 Y , 这样 R_{yy} 变为对角矩阵, 从而简化了 R_{yy}^{-1} 的计算。空间域级联去相关的功能图如图 2 所示, 处理单元 $S_{i,j}$ 具有二个输入信号, 输出信号与左边输入信号不相关, 级联去相关后的输出 y_0, y_1, y_2 互不相关。所以

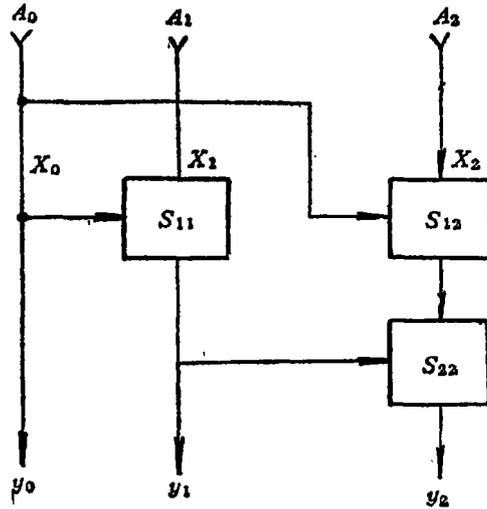


图 2 三单元阵列级联去相关

$$E\{y_i^* y_j\} = \sigma^2 \delta_{ij} \tag{11}$$

$$R_{yy} = \sigma^2 I \tag{12}$$

用 Y 代替 X 时, 最佳权方程(7)变为

$$W'_{o, p_i} = R_{yy}^{-1} r_{yd} \tag{13}$$

因为 R_{yy} 是对角矩阵, 故得权矢量的各元素为

$$w'_i = E\{y_i d^*\} / \sigma^2 \tag{14}$$

各处理单元的结构相同, 便于硬件实现, 而且是并行处理的, 计算速度快。

最大熵谱法 用 Burg 的最大熵谱法(MEM)^[5]从序列数据中提供必要的统计信息, 可以直接算出 R^{-1} 而不必先确定 R 。这样就避免了算矩阵的逆所耗费的时间。MEM 法从原理上讲就是全极点模型的线性预测, 用这种方法, 从一阶预测滤波器开始到 L 阶预测滤波器, 系统地计算 L 组预测滤波器系数。其中某一阶 l 的最后一个系数 $a_{l,l}$ 是使用平均误差功率最小来得到的。得到 $a_{l,l}$ 之后, l 阶预测滤波器系数 $a_{l,i}$ 和预测误差功率 p_l 可用递推方程计算出来。若给定复数数据 $x_i, i=1, 2, \dots, N$, 用 Burg 方法计算出 $a_{l,i}$ 和 $p_l, l=1, 2, \dots, L; i=1, 2, \dots, l$ 。 R^{-1} 与 $a_{l,i}$ 和 p_l 之间, 存在着唯一关系

$$R^{-1} = ADA^H \tag{15}$$

其中 A 为由 $a_{l,i}$ 组成的 $N \times N$ 三角矩阵, A^H 为 A 的共轭转置; D 为由 p_l 组成的 $N \times N$ 对角矩阵。用 MEM 法求 R^{-1} 比 DMI 法有更快的收敛速度, 它特别适用于可资用的独立数据样本数少的情况。

三、在雷达中的应用

1. 雷达旁瓣对消器

它可有效地降低雷达系统通过旁瓣接收干扰信号的影响, 最早是采用 Howell—Applebaum 方法实现, 其响应速度慢, 而且收敛速度与输入信号相关矩阵的特征值散

布程度有关,对消比和响应速度互相矛盾。比较好的办法是采用级联去相关处理器^[6],它又称 Gram—Schmidt 处理器或 G—S 对消器。参考图 2,若将图 2 中 A_0 、 A_1 作为辅助天线, A_2 作为主天线,则成为具有二个辅助单元的 G—S 旁瓣对消器。一种硬件实现方案如图三所示。图中上面部分完成实时处理,而下面部分对实时结果缓冲之

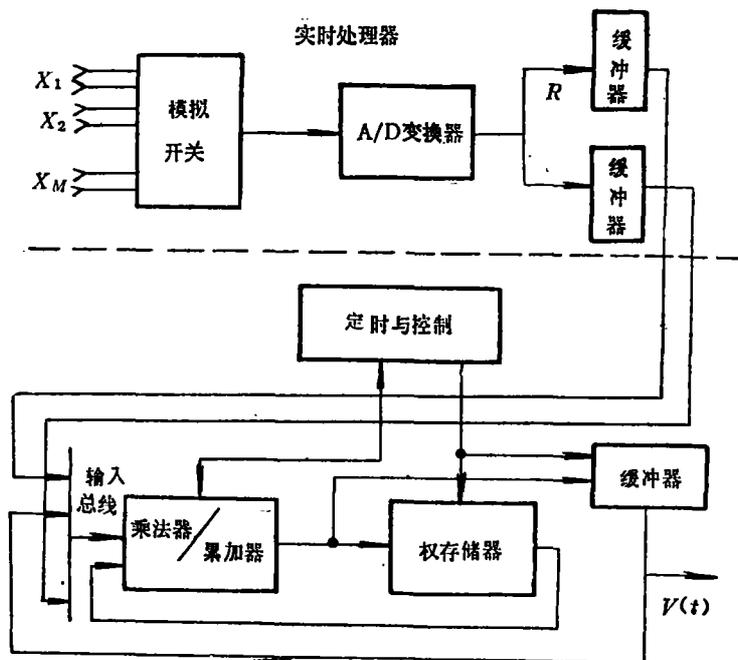


图 3 G—S法硬件实现框图

后,采用一单独的计算装置去获得加权。来自主天线和辅助天线的信号用模拟开关来多路转换,并进行串行处理,这就可以使用单独的模—数变换器。采用高速模—数变换器以每秒 20 兆取样速率数字化模拟信号,其输出存储在缓冲器中,缓冲器用 RAM 实现。处理器 S_{ij} 用高速乘法器/累加器实现,每隔 125ns 完成一步计算,每 500ns 完成输入和上述存储加权复数相乘,大约 1000ns 之后,获得修正的加权,并存储在加权存储器中。求出每个处理器 S_{ij} 计算的输出值后,去相关样本就可以估算出来,从而进行下一次权调整的计算。

2. 高分辨力测向

在雷达侦察中,应用自适应天线阵列处理技术测向,可以获得很高的角度分辨力。把近代谱估计技术用于空间阵列数据处理,可以得到入射辐射源功率—方位分布的角谱图,达到超分辨能力。基本原理如下:设天线为 N 个单元的线性阵列,空间有 p 个辐射源入射到天线上,天线阵的输出为

$$X = \sum_{m=1}^p g_m D(\alpha_m) + n \quad (16)$$

X 为 N 维矢量,其中 g_m 为第 m 个源的阵增益, $D(\alpha_m)$ 为第 m 个源的方向矢量 (N 维), α_m 为第 m 个源的方向角, n 为 N 维噪声矢量, n 的各元素互相独立,方差均等于 σ^2 。噪声协方差矩阵为

$$M = E\{n^*n'\} = \sigma^2 I \quad (17)$$

接收信号 X 的协方差矩阵为

$$\begin{aligned} R &= E\{X^*X'\} \\ &= R_s + M \end{aligned} \quad (18)$$

协方差矩阵 R 有 N 个非零特征值, 其中 $N - p$ 个特征值均等于 σ^2 , 且为最小特征值 λ_1 。最小特征值 λ_1 对应的特征矢量为 U_1 , 可以证明 U_1 与方向矢量 $D(\alpha_m)$ 存在如下关系^[7]

$$D'(\alpha_m)U_1 = 0 \quad m = 1, 2, \dots, p \quad (19)$$

上式表明 R 的最小特征值对应的特征矢量与全部源方向矢量正交。我们可以利用它进行测向。设函数 $f(\alpha) = D'(\alpha)U_1$, $f(\alpha) = 0$ 时的 α 即为源的方向。实际上, 定义函数

$$\text{Seig}(\alpha) = \frac{1}{|D'(\alpha)U_1|^2} \quad (20)$$

为特征矢量谱, 用它来作源方向的指示。因为若 $\alpha = \alpha_m$ 时, $D(\alpha_m)$ 和 U_1 正交, 在 α_m 方向产生一个很锐的尖峰, 所以由特征矢量谱图上的尖峰位置就可以确定源的方向角。源方向已知后就可以估计源的功率。

最小特征值对应的特征矢量 U_1 , 可以用迭代法计算:

$$U(0) = [1, 0, \dots, 0]' \quad (21a)$$

$$\tilde{U}(k+1) = R^{-1}U(k) \quad (21b)$$

$$U(k+1) = \frac{\tilde{U}(k+1)}{|\tilde{U}'(k+1)\tilde{U}^*(k+1)|^{1/2}} \quad (21c)$$

式中 R^{-1} 可用最大熵谱法计算。

图 4 中为三个辐射源位于 -60° , 10° 和 30° 时的特征矢量谱图, 在源方向有极强的尖峰, 输入信噪比变化时, 对谱图影响很小。所以, 可以在强干扰背景中获得极高的测角分辨力。

3. 自适应雷达信号检测

自适应滤波器已日渐应用于雷达信号的检测^[8], 在各种杂波环境中自适应地检测目标, 自适应地测量多普勒频率等等。例如, 要检测具有多普勒频率 f_d 的目标, 可采用时域自适应滤波器, 再加上包络检波器和门限装置。设雷达接收到的是 N 个脉冲的相参脉冲串, 间距 T 秒, 是某个距离单元内的回波。回波信号用 X 矢量表示, 它是信号 S 和杂波 C 的组合, 都是 N 维矢量。因为要检测具有 f_d 的回波, 故所需信号的样本为 $S_i = \exp$

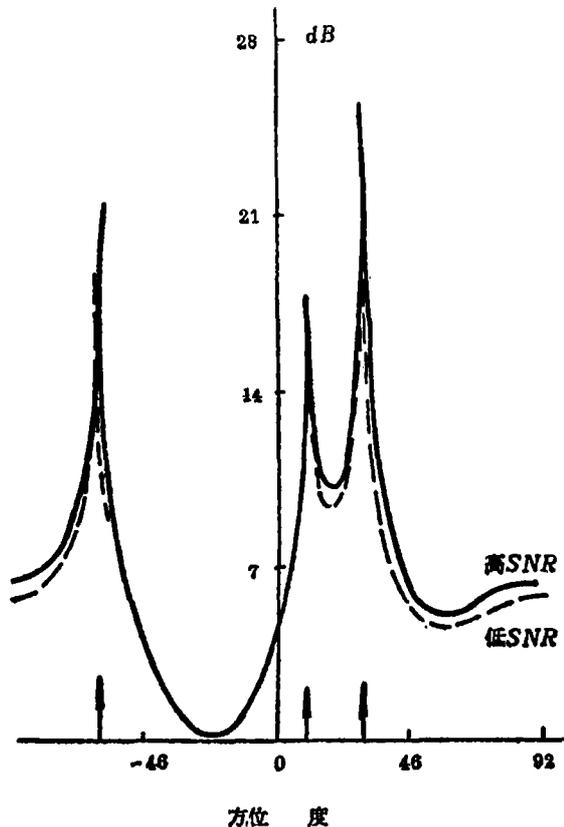


图 4 三个源的特征矢量谱

$(-j2\pi(i-1)f_dT)$ 。杂波为零均值时，其协方差矩阵 $M = E\{C^*C^T\}$ 。在[3]中证明当检测概率最大时，最佳权方程为

$$W_{opt} = M^{-1}S^* \tag{22}$$

求解(22)的自适应算法，可以用DMI也可以用级联去相关(G-S)算法。根据当前的器件水平，用G-S算法比较适宜，因为硬件要求不太高，瞬态响应速度也较快，能较好地满足设计要求。一种用G-S级联去相关法的实现方案如图5所示。图中D表示图2中所示的去相关级联处理器。整个系统分解成：白化滤波器（去相关级联处理器），匹配滤波器，包络检波器和门限装置。计算机仿真结果表明：改善因子35dB左右，瞬态响应时间 $10N$ ，当 $N=5$ 时，为 $50T$ ，约为30~50毫秒左右。

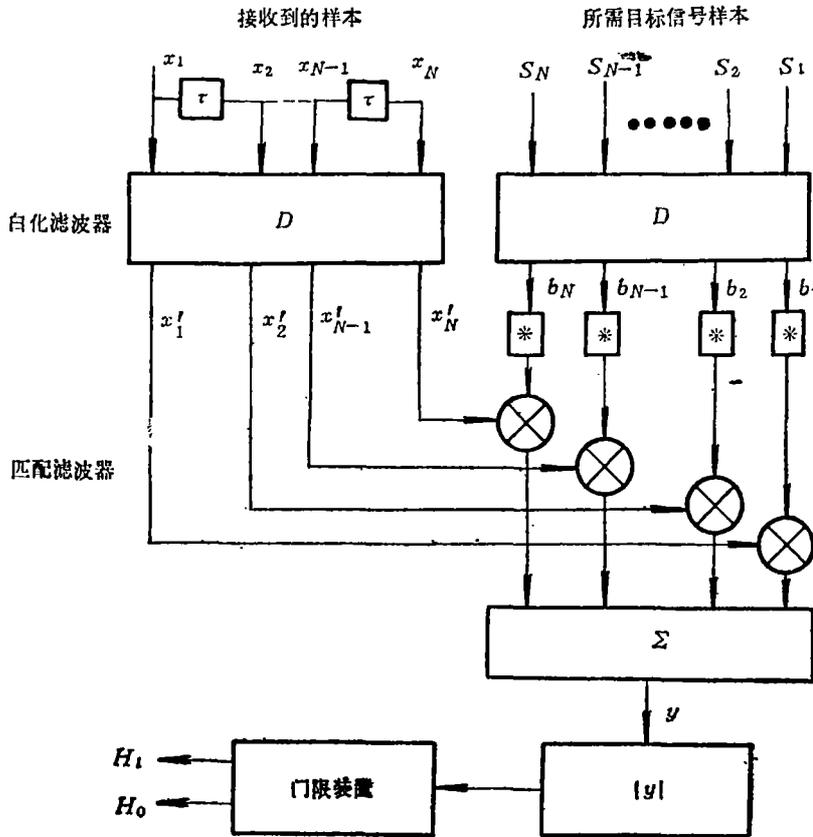


图5 自适应雷达信号检测器

四、结束语

自适应信号处理技术在通信和雷达系统中得到越来越广泛的应用，因为这些系统都面临着抵抗人为和自然干扰的新的严厉的要求。在这方面，自适应信号处理技术大大优于经典的信号处理技术，它可以补偿元部件的不精确性，克服对信号和干扰环境先验信息的贫乏，在环境变化时，自动地调整处理器参数，使系统工作于最佳状态。在过去十多年里，自适应信号处理的基本理论已经建立，积累了很多实践经验。目前正向实际应用

方向研究,主要研究课题是提高自适应速度,增大带宽和降低硬件复杂性和造价。随着微电子技术和计算机技术的高速发展,实时处理复杂信号的能力已大有改观,造价趋于合理。可以预期,自适应信号处理技术将会得到更广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] Applebaum, S.P., Adaptive arrays, IEEE Trans, AP-24, 585—590, Sept. 1976.
- [2] Widrow, B., Adaptive antenna systems, proc. IEEE, Vol.56, 2143—2159, Dec. 1967.
- [3] Monzingo, R.A., Miller, T.W. Introduction to adaptive arrays, 1980 John Wiley and Sons.
- [4] Mcwhirler, J.G., Adaptive algorithms in the Space and time domains, proc. IEE, -Vol 130, partf, No.1, Feb. 1983, pp17—21.
- [5] Sawyers, J.H., Adaptive pulse-Doppler radar signal processing Using the maximum entropy method, IEEE 1980 EASCON, pp454—461.
- [6] Bucciarelli, T., The Gram-Schmidt Side lobe canceller, 1982 International Radar Conf. pp486—490.
- [7] Durrani., T.S, Eigenfilter approaches to adaptive array processing, IEE proc. -F, Feb. 1983, pp22—28.
- [8] Farina, A., Adaptive methods to implement the optimum radar signal processor, proceedings of IRSI 83, pp42—47.

Adaptive Signal Processing Techniques and its Applications

Lu Zhongliang

Abstract

The paper describes basic principles of adaptive signal processing and its some new fast algorithms. Three examples of its application to radar systems are given; radar sidelobe canceller, high resolution direction finding and adaptive radar signal detection.