

# 极化自适应递推滤波算法

徐振海, 王雪松, 肖顺平, 庄钊文

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 针对未知和时变的杂波环境, 探讨了极化域滤波问题, 提出了极化自适应滤波的原理: 利用历史杂波数据估计杂波的极化信息, 据此对天线极化进行调整, 达到“最优”, 然后对当前接收电场进行滤波. 根据这一原理进一步提出了递推算法. 仿真实验结果也证明了该方法的有效性. 该滤波器稳态性能逼近理论最优, 算法“学习”曲线反映了滤波器的过渡特性.

**关键词:** 极化; 自适应; 滤波

**中图分类号:** TN95      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372 2112 (2002) 04 0608 03

## Adaptive Recursive Filtering in Polarization Domain

XU Zhen hai, WANG Xue song, XIAO Shun ping, ZHUANG Zhao wen

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** Filtering in polarization domain has been investigated with respect to the unknown and time varying clutter or interference environment. An adaptive recursive filtering algorithm is proposed. At first, the polarization coherence matrix is estimated by the independent secondary data. Then the polarization of antenna is optimized according to the polarization information. At last, the minimum complex volume is obtained. The recursive scheme makes it go fluently. The simulation experiments demonstrate its validity. The performance curve of stability approaches the optimum theoretically. The study curve reflects its transition property.

**Key words:** polarization; adaptive; filtering

### 1 引言

极化信息在雷达目标检测、识别、滤波增强方面有着巨大的应用潜力, 尤其在极化滤波抗干扰方面, 应用前景广阔. 当杂波和信号在时域、频域以及空域的状态特征都很接近时, 可以考虑利用干扰和信号在极化域的差别来有效区分, 抑制干扰同时增强信号. 极化是除时域、频域和空域信息以外的可资利用的又一重要信息. 对于单个杂波干扰, 其本身具有确定的极化状态, 因此可以通过使用与之正交的雷达接收天线来抑制干扰, 正交极化接收本身就是一极化滤波器. 需要着重指出的是虚拟极化适配概念的提出使得极化滤波问题由前端天线硬件调整转化为后端软处理. 然而纵观前人所做的工作, 他们大都假设干扰或信号的极化状态是已知的, 在此前提下进行了严密的理论推导. 在实际工程应用中, 干扰杂波的极化状态并不都是先验可知的, 并且还常随时间或空间缓慢变化, 因此需要研究极化自适应滤波问题. 极化自适应滤波其核心思想就是要实时地估计干扰的极化, 检测干扰极化状态的变化, 实时调整接收天线的极化形式使之与干扰极化自始至终正交. 当杂波干扰极化特性未知时, 极化滤波器调整自己参数的过程称为“学习”, 而当杂波干扰极化特性变化时, 极化滤波器调整自己参数的过程称为“跟踪”. 自适应极化滤波的思想比较直观<sup>[1-3]</sup>, 下面给出自适应极化滤波原理框图.

### 2 极化估计

#### 2.1 极化数据模型

令  $h, v$  分别表示接收天线两个正交极化通道, 比如水

平、垂直极化. 则任何

接收电场可表示为:

$$X = X_h h + X_v v.$$

也可以用复二维向量表示:

$$X = [X_h, X_v]^T.$$

对于杂波干扰而言, 其

为随机复向量, 实际工程应用中, 我们可以获取其样本. 假设

已获取的随机样本集为  $\{X_1, X_2, \dots, X_M\}$ , 它们可以表示一系列

相邻距离分辨单元的雷达回波, 也可以表示同一距离分辨

单元相邻脉冲扫描周期的雷达回波. 特别地, 本文仅考虑独立

采样的情形. 研究中作如下假设:

(1) 杂波极化矢量服从复正态分布, 杂波矢量具有零均

值, 并且独立同分布.

(2) 接收机噪声为独立高斯白噪声.

(3) 在  $1 \dots M$  样本单元内没有目标.

(4) 极化系统采用单极化发射正交双极化接收, 数据由两个

正交分量组成, 每个极化通道都是复基带信号.

(5) 雷达系统相对目标而言为窄带系统, 总的雷达带宽不

足以分辨目标, 目标处于同一个分辨单元, 并且独立于杂波.

#### 2.2 相干极化矩阵的估计

雷达极化信息可以由极化相干矩阵完全表征<sup>[4]</sup>, 极化相

干矩阵定义为:

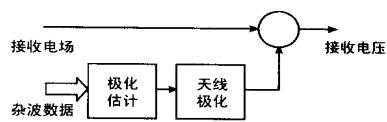


图1 自适应递推极化滤波原理框图

$$C = E\{XX^H\} \quad (1)$$

其中: 上标“H”表示共轭转置, 可以看出  $C$  是 Hermite 矩阵.

实际工程应用中, 极化相干矩阵是不能先验得到的, 根据上述假设条件, 其最大似然估计为:

$$\mathbf{C} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mathbf{X}_m \mathbf{X}_m^H \quad (2)$$

即统计平均转化为集合平均来近似估计。

由假设条件(1) 可得随机复矢量  $X$  的概率密度:

$$f_X(\mathbf{X}) = (1/\pi^2 |\mathbf{C}|) \exp\{-\mathbf{X}^H \mathbf{C}^{-1} \mathbf{X}\} \quad (3)$$

极化相干矩阵估计  $\mathbf{C}$  服从复 Wishart 分布, 其概率密度为:

$$f_C(\mathbf{C}) = \frac{M^{Mq} \cdot |\mathbf{C}|^{M-q}}{G(M, q) |\mathbf{C}|^M} \exp\{-M \cdot \text{TR}(\mathbf{C}^{-1} \mathbf{C})\} \quad (4)$$

其中:  $\mathbf{C}$  为正定矩阵。  $G(M, q) = \pi^{q(M-1/2)} \cdot \Gamma(M) \cdot \dots \cdot \Gamma(M-q+1)$ ,  $q=2$  表示向量  $X$  的维数。  $\Gamma(\cdot)$  为 Gamma 函数。

显然, 极化估计量是样本数  $M$  的函数, 极化相干矩阵元素估计的精度与  $M$  有关, 即正比于  $M^{-1/2}$ 。 因此要提高估计的精度, 必须增加采样点的数量, 然而由独立采样定理以及信号时宽的限制,  $M$  不可能很大。 对于非独立样本的情况, 本文暂不考虑。

### 3 接收天线极化优化

假设杂波的极化相干矩阵为  $\mathbf{C}$ , 天线极化 Jones 矢量为  $\mathbf{h}$ , 它为完全极化且满足单位增益约束, 则接收杂波功率为:

$$P = \mathbf{h}^T \mathbf{C} \mathbf{h}^* \quad (5)$$

最佳天线极化为下面约束条件优化问题的解:

$$\min P = \mathbf{h}^T \mathbf{C} \mathbf{h}^*, \quad \text{s. t.} \quad \|\mathbf{h}\| = 1$$

由于  $\mathbf{C}$  为 Hermite 矩阵, 其最优解为矩阵  $\mathbf{C}$  最小特征值所对应的特征矢量的共轭<sup>[4]</sup>。  $\mathbf{C}$  的两个特征值为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ , 不妨设  $\lambda_1 \geq \lambda_2$ , 并设  $\mathbf{x}_1$  和  $\mathbf{x}_2$  分别为  $\lambda_1, \lambda_2$  对应的特征矢量。 记

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{hh} & C_{hv} \\ C_{vh} & C_{vv} \end{bmatrix}$$

则两个特征值为:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \left\{ \text{Tr} \mathbf{C} + \sqrt{(\text{Tr} \mathbf{C})^2 - 4 \text{Det} \mathbf{C}} \right\} / 2 \\ \lambda_2 = \left\{ \text{Tr} \mathbf{C} - \sqrt{(\text{Tr} \mathbf{C})^2 - 4 \text{Det} \mathbf{C}} \right\} / 2 \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $\text{Tr}[\cdot]$  表示矩阵的迹。  $\text{Det}[\cdot]$  表示矩阵的行列式。

相应的特征矢量为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} -2C_{hv} \\ C_{vv} - C_{hh} + \sqrt{(\text{Tr} \mathbf{C})^2 - 4 \text{Det} \mathbf{C}} \end{bmatrix} \\ \mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} 2C_{hv} \\ C_{vv} - C_{hh} - \sqrt{(\text{Tr} \mathbf{C})^2 - 4 \text{Det} \mathbf{C}} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

它们是一对正交矢量, 即有  $\mathbf{x}_1^H \mathbf{x}_2 = 0$ 。

使天线接收功率达到最小的接收极化为:

$$\mathbf{h}_{opt} = \mathbf{x}_2^* / \|\mathbf{x}_2\| \quad (8)$$

相应的最小接收功率为:

$$P_{min} = \mathbf{h}_{opt}^T \mathbf{C} \mathbf{h}_{opt}^* = (\mathbf{x}_2^H \mathbf{C} \mathbf{x}_2 / \|\mathbf{x}_2\|^2) = (\lambda_2 / \|\mathbf{x}_2\|^2) \quad (9)$$

### 4 递推算法

递推算法是为了实时“跟踪”杂波干扰极化特征的变化, 调整天线的极化, 使得滤波器参数适应环境的变化。 极化参数估计可以认为是“学习”过程, 所谓“学习”, 即利用已有的历史数据获取信号所蕴含的极化信息; 递推算法相当于“跟踪”过

程, 所谓“跟踪”, 即在已有的极化信息基础上结合新观测得到的数据更新极化信息。

设已经获得  $n$  时刻极化相干矩阵的估计  $\mathbf{C}_n$ , 由式(7)、(8)可以得到当前时刻最优的天线极化  $\mathbf{h}_n$ ,  $n+1$  时刻接收电场为  $\mathbf{X}_{n+1}$ , 则滤波后接收电压为:

$$V_{n+1} = \mathbf{h}_n^T \cdot \mathbf{X}_{n+1} \quad (10)$$

根据电场  $\mathbf{X}_{n+1}$  对极化估计量进行修正得到:

$$\mathbf{C}_{n+1} = (1-\lambda) \mathbf{C}_n + \lambda \mathbf{X}_{n+1} \mathbf{X}_{n+1}^H = \mathbf{C}_n + \lambda (\mathbf{X}_{n+1} \mathbf{X}_{n+1}^H - \mathbf{C}_n) \quad (11)$$

其中:  $0 \leq \lambda < 1$  为新数据权重因子, 这里取  $\lambda = \frac{1}{M}$ , 则:

$$\mathbf{C}_{n+1} = \mathbf{C}_n + \frac{1}{M} (\mathbf{X}_{n+1} \mathbf{X}_{n+1}^H - \mathbf{C}_n) = \frac{M-1}{M} \mathbf{C}_n + \frac{1}{M} \mathbf{X}_{n+1} \mathbf{X}_{n+1}^H \quad (12)$$

定义极化新息矩阵为:

$$\mathbf{R} = \mathbf{X}_{n+1} \mathbf{X}_{n+1}^H - \mathbf{C}_n \quad (13)$$

其反映了杂波极化特征的变化量。

初始值  $\mathbf{C}_0$  可以取为一 Hermite 矩阵。

### 5 仿真算例

在仿真实验中考虑了接收机噪声的影响。 由前面的假设, 接收机噪声服从独立复正态分布。 记为:  $\mathbf{n} = [n_h, n_v]^T$ 。 其均值为  $\mathbf{0}$ , 协方差矩阵为  $\mathbf{K}_n = \sigma_n^2 \mathbf{I}_{2 \times 2}$ , 这意味着接收机噪声可视为完全未极化波。 实验中干扰噪声比为 10dB。

#### 5.1 极化“突变”检测

在该实验中, 杂波序列长度为 200, 前 100 点为左旋圆极化, 后 100 点为右旋圆极化, 杂波强度不变。 取  $M=10$ , 极化相干矩阵初始值选为:  $\mathbf{C}_0 = \mathbf{I}_{2 \times 2}$ 。 仿真结果见图 2。

滤波起始时极化信息未知, 初始极化参数选择具有任意性, 杂波抑制效果不好, 进入稳态后, 天线极化收敛到最优值, 滤波效果较好; 当杂波干扰极化发生“突变”后, 滤波器迅速

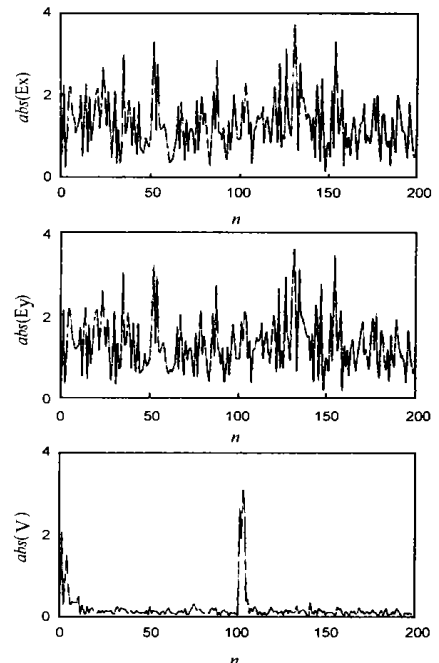


图 2 极化“突变”检测仿真结果

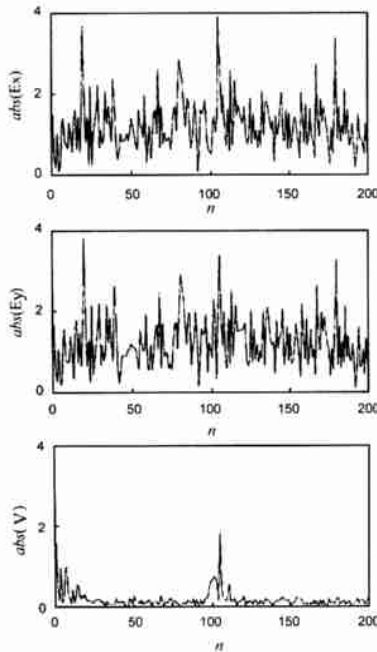


图 3 极化信号检测仿真结果

“跟踪”其变化,并重新自适应地调整滤波器参数达到最优。

对消的性能与极化度有关,极化度越高,滤波效果越好。

## 5.2 极化信号检测

在该实验中,杂波为左旋圆极化,在区间 $[90, 110]$ 内加入信号,信号强度杂波较弱,但极化特性与杂波有差异。取  $M=10$ ,极化相干矩阵初始值选为:  $C_0 = I_{2 \times 2}$ 。仿真结果见图 3,可见滤波效果较好。利用信号和杂波在极化特性方面的差异,可以滤除杂波、增强信号,进一步改善信号检测性能。

## 6 性能分析

### 6.1 滤波器稳态性能以及与理想滤波器比较

定义极化自适应滤波器的抑制比为:  $R = 10 \lg \left( P_{out} / P_{in} \right)$ ,图 4 给出了抑制比与电波极化度的关系曲线。曲线表明:随着电磁波极化度的增大,抑制比变大。极化自适应滤波器的性能逼近“最优”极化滤波器。主要是由于滤波器进入稳态后,天线极化仍然随机起伏的缘故。

### 6.2 过渡过程及学习曲线

自适应算法的误差过渡过程称为“学习”曲线。由图 5 可以看出:“学习”曲线与估计样本数  $M$  有关,当  $M$  较大时,“学

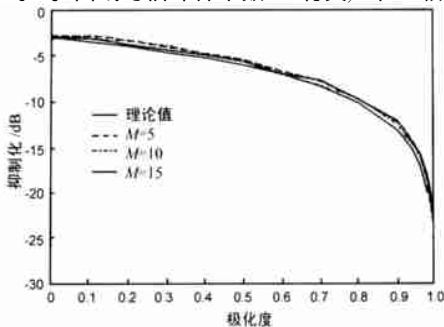


图 4 滤波器抑制比与极化度的关系曲线

习”速度较慢,但是稳态误差起伏较小;当  $M$  较小时,“学习”速度较快,但是稳态误差起伏较大。仿真实验中,电磁波极化度为 0.9,极化相干矩阵初始值选为:  $C_0 = I_{2 \times 2}$ 。

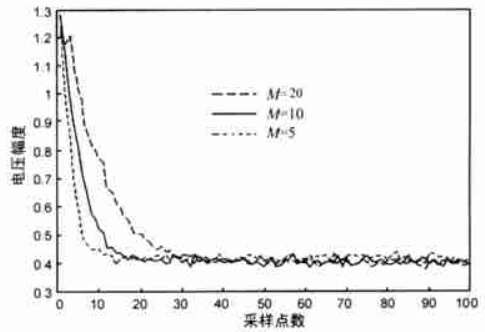


图 5 适应极化滤波器“学习”曲线

## 7 结束语

在杂波干扰极化未知和时变的情况下研究了极化自适应域滤波问题,提出了序贯递推算法。本文的研究工作使得极化自适应滤波算法更加完善,向工程化迈进了一步。仿真算例也表明该方法的有效性,该滤波器稳态性能逼近理论“最优”,算法“学习”曲线反映了滤波器的过渡特性。极化自适应滤波可以应用于雷达抗干扰以及微弱电磁信号检测等领域。对于极化相干矩阵的估计,本文对样本的独立性要求比较苛刻,应进一步考虑非独立采样条件下的极化估计问题。另外,还应考虑宽带、超宽带雷达系统极化域滤波问题,这些都需要作深入的研究。

### 参考文献:

- [1] A J Poelman. Virtual polarization adaptation [J]. IEE Proc, 1981, 128 (5): 261-270.
- [2] R S Raghavan, N Pulsone. Adaptive estimation of the polarization of a signal [J]. IEEE Trans on AES, 1995, 31(2): 845-852.
- [3] 李卓林. 雷达极化滤波在抗干扰中的应用研究 [D]. 北京: 航天二院, 1997.
- [4] 庄钊文, 肖顺平, 王雪松. 雷达极化信息处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [5] Russell Brown, Hong Wang. An adaptive multiscan processor for polarimetric radar [J]. IEEE National Radar Conference, 1994: 95-100.
- [6] Andrei A Monakov. Estimation of the covariance matrix for dependent signal samples: Polarization diversity systems [J]. IEEE Trans on AES, 1994, 30(2): 484-492.

### 作者简介:



徐振海 男, 1977 年 9 月生于河南省卫辉市, 博士生, 1998 年毕业于国防科学技术大学电子工程学院, 同年保送攻读博士学位, 已发表学术论文 10 篇, 主要研究方向为: 雷达极化信息处理, 目标检测与识别, 综合电子战。