

线性预测类 STAP 方法研究

吴洪^{①②} 王永良^② 陈建文^②

^①(国防科学技术大学电子工程学院 长沙 410073)

^②(空军雷达学院雷达兵器运用军队重点实验室 武汉 430019)

摘要: 线性预测类 STAP 方法在很少的样本数下就能达到稳定的性能, 特别适合非均匀杂波环境。该文分析了线性预测类 STAP 方法具有较好非均匀处理性能的原因, 并给出了线性预测类 STAP 方法的定阶公式。仿真结果验证了所得结论的正确性。

关键词: 空时自适应处理; 杂波抑制; 线性预测; 非均匀

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)05-1060-04

Research on Linear-Prediction-Type STAP Methods

Wu Hong^{①②} Wang Yong-liang^② Chen Jian-wen^②

^①(Institute of Electronic Engineering, NUDT, Changsha 410073, China)

^②(Key Research Lab. Wuhan Radar Institute, Wuhan 430019, China)

Abstract: Linear-prediction-type STAP methods greatly reduced the demand of Independent Identical Distribution(IID) samples, which made Linear-prediction-type STAP methods adapted well to non-homogeneous clutter environment especially. In this paper linear-prediction-type STAP methods is analyzed in detail, and the formula of how to determinate the order of Linear-prediction-type STAP methods is proposed. All conclusions are proved using simulation results.

Key words: Space-Time Adaptive Processing (STAP); Clutter suppression; Linear prediction; Non-homogeneity

1 引言

机载预警雷达面临的真实杂波环境往往是非均匀的^[1], 因此非均匀环境下的空时自适应处理(STAP)方法受到越来越广泛的关注。近年来提出的参数自适应匹配滤波法^[2-4](PAMF)和空时自回归滤波法^[5](STAR), 是两种与传统空时自适应处理结构完全不同的新方法, 两种处理结构之间有内在联系, 本文统称为线性预测类空时自适应处理方法。已有文献[2-5]仅利用仿真结果验证了线性预测类 STAP 方法比传统 STAP 方法更适合非均匀杂波环境, 没有从本质上解释线性预测类方法具有优良非均匀处理性能的原因。在已有文献[2-5]中, 对线性预测类 STAP 方法滤波器的定阶都是采用信息论准则(如 AIC 准则法), 信息论准则定阶方法是一种自适应定阶方法, 需要较大的计算量, 不便于工程实现。本文从线性代数的观点对线性预测类 STAP 方法具有优良非均匀处理性能的本质进行了研究, 研究表明线性预测类 STAP 方法实际上是一种降维降秩相结合的方法。通过对结构化降维 STAP 方法的研究, 本文还给出了线性预测类 STAP 方法定阶公式, 与信息论准则定阶法相比, 新的定阶法更有利于工

程实现。

2 线性预测类 STAP 方法原理

在机载预警雷达信号处理中, 设雷达天线由 N 个(等效)阵元组成, 在相干处理间隔(CPI)内选择的相干脉冲数为 K , 将第 n 个阵元第 k 次快拍的接收数据记为 x_{nk} , 把 x_{nk} 排成 $NK \times 1$ 的列矢量 \mathbf{X} , 那么在 H_0 (无目标, 只有杂波和噪声)和 H_1 (有目标存在)二元假设下, \mathbf{X} 可以表示成如下形式

$$\mathbf{X} = \begin{cases} b\mathbf{S} + \mathbf{C} + \mathbf{N}, & H_1 \\ \mathbf{C} + \mathbf{N}, & H_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 b 为目标复回波幅度; \mathbf{C} 、 \mathbf{N} 分别为杂波和内部热噪声矢量; \mathbf{S} 为归一化信号空时导引矢量, 即 $\mathbf{S}^H \mathbf{S} = 1$ 。

2.1 PAMF^[2-4] 方法介绍

数据矢量 \mathbf{X} 是由 N 个阵元, K 个脉冲的回波数据组成, 可看作 K 个 N 维分量 $\mathbf{x}(i)$ 组成的 N 维输入时间序列。按照匹配滤波器理论, 空时自适应最优处理器可认为是由矩阵白化滤波器与匹配滤波器级联而成, 其中矩阵白化滤波器由多维线性预测误差滤波器与残差白化滤波器组成, 多维线性预测误差滤波器和残差白化滤波器分别完成对输入 N 维时间序列在时域和空域上的白化。最优处理器中的多维线性预测滤波器的阶数、滤波器参数以及残差白化滤波器参数都随着输入时间变化^[2-4], 使得滤波器结构设计起来非常复杂,

2006-10-30 收到, 2007-04-30 改回

国家级基金和全国高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划 (TRARoyT) 资助课题

不便实现。

PAMF 方法利用固定的阶数和模型参数来设计 N 维线性预测误差滤波器与残差白化滤波器,大大简化滤波器设计过程。假定阶数为 P , 则 N 维线性预测误差滤波器参数是如下最优化问题^[2-4]的解

$$\min \left(\sum_{n=1}^{K-P} \left\| \sum_{k=0}^P \mathbf{A}_k \mathbf{x}(n+k) \right\|_F^2 \right) \quad (2)$$

其中 $\|\cdot\|_F$ 表示矩阵的 Frobenius 范数, $\mathbf{A}_0 = \mathbf{I}$ 。令 $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_0$

$$\mathbf{A}_1 \cdots \mathbf{A}_p]^H, \quad \mathcal{X}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(1) & \cdots & \mathbf{x}(K-P) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{x}(P+1) & \cdots & \mathbf{x}(K) \end{bmatrix}, \quad \text{其中 } \mathcal{X}_k \text{ 表示}$$

由第 k 个距离单元的数据经平滑构成, L 个距离门构成的数据矩阵 $\mathcal{X} = [\mathcal{X}_1 \cdots \mathcal{X}_L]$, 为了确保数据矩阵行满秩, L 必须满足

$$L \geq \left\lceil \frac{N(P+1)}{K-P} \right\rceil \quad (3)$$

其中 $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整函数, 可以看到, 由于使用了数据平滑使样本数增加了 $K-P$ 倍, 缓解了 STAP 方法中样本数不足的矛盾。为了使估计的滤波器参数能很好匹配真实模型, 实际的解模型参数的方程可简化表达为

$$\hat{\mathbf{A}} = \arg \min_{\mathbf{A}} \|\mathbf{A}^H \mathcal{X}\|_F^2 \quad (4)$$

为避免平凡解, 有 $\mathbf{A}^H \mathbf{A} = \mathbf{I}$ 的约束。求出 $\hat{\mathbf{A}}$ 以后, 残差白化滤波器 $\mathbf{D}_p^{-1/2}$ 由 $\mathbf{D}_p^{-1/2} = (\hat{\mathbf{A}}^H \mathcal{X} \mathcal{X}^H \hat{\mathbf{A}})^{-1/2}$ 求出。利用 N 维线性预测误差滤波器的参数和残差白化滤波器组成矩阵白化滤波器

$$\hat{\mathcal{H}}_{\text{PAMF}} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_p^{-1/2} \mathbf{A}_0 & \cdots & \mathbf{D}_p^{-1/2} \mathbf{A}_p & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{D}_p^{-1/2} \mathbf{A}_0 & \cdots & \mathbf{D}_p^{-1/2} \mathbf{A}_p \end{bmatrix} \quad (5)$$

求出的矩阵白化滤波器 $\hat{\mathcal{H}}_{\text{PAMF}}$ 是 $N(K-P) \times NK$ 维矩阵。

根据匹配滤波理论^[5]或正交投影理论^[5,6], 由估计的矩阵白化滤波器 $\hat{\mathcal{H}}_{\text{PAMF}}$ 可构成不同的空时自适应权矢量。采用匹配滤波理论, 空时自适应权为 $\mathbf{W}_{\text{PE}} = \hat{\mathcal{H}} \hat{\mathcal{H}}^H \mathbf{S}$ 。采用正交投影理论, 空时自适应权为 $\mathbf{W}_{\text{MS}} = \mathbf{P}_{\hat{\mathcal{H}}} \mathbf{S}$ 。其中 $\mathbf{P}_{\hat{\mathcal{H}}} = \hat{\mathcal{H}} (\hat{\mathcal{H}}^H \hat{\mathcal{H}})^{-1} \hat{\mathcal{H}}^H$ 是对矩阵 $\hat{\mathcal{H}}$ 的投影矩阵, 理想情况下 $\mathbf{P}_{\hat{\mathcal{H}}}$ 与杂波子空间正交^[5]。

文献[5]已经证明正交投影理论下的空时自适应权比匹配滤波理论下的空时自适应权有更好的杂波抑制性能。

2.2 STAR^[5]方法介绍

STAR 方法原理与 PAMF 方法基本一致, 只是采用的多维线性预测误差滤波器模型有所不同。STAR 估计的 N 维线性预测误差滤波器模型参数所求解的最优化方程^[5]为

$$\min \left(\sum_{n=1}^{K-P} \left\| \sum_{k=0}^P \mathbf{B}_k \mathbf{x}(n+k) \right\|_F^2 \right) \quad (6)$$

在 PAMF 方法中, 模型参数 \mathbf{A}_k 是 $N \times N$ 的方阵且 $\mathbf{A}_0 = \mathbf{I}$, 即所选多维线性预测误差滤波器模型参数不会改变输出时间序列维数, 输出时间序列仍为 N 维。而在 STAR 方法中, 模型参数 \mathbf{B}_k 是 $N' \times N$ 的矩阵, $N' \leq N$ 且 $\mathbf{B}_0 \neq \mathbf{I}$, 即 STAR 方法所选多维线性预测误差滤波器模型参数将使输出时间序列变为 N' 维。不仅如此, STAR 方法还增加了匹配杂波子空间的自由度^[5], 对输入多维时间序列的白化更彻底。STAR 方法在杂波抑制性能上较 PAMF 有一定改善^[5]。最终解模型参数的最优化方程可简化表达为

$$\hat{\mathbf{B}} = \arg \min_{\mathbf{B}} \|\mathbf{B}^H \mathcal{X}\|_F^2 \quad (7)$$

为避免平凡解, 有 $\mathbf{B}^H \mathbf{B} = \mathbf{I}$ 的约束。

STAR 方法的矩阵白化滤波器的估计式为

$$\hat{\mathcal{H}}_{\text{STAR}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_0 & \cdots & \mathbf{B}_p & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{B}_0 & \cdots & \mathbf{B}_p \end{bmatrix} \quad (8)$$

所得矩阵白化滤波器 $\hat{\mathcal{H}}_{\text{STAR}}$ 是 $N'(K-P) \times NK$ 维矩阵。STAR 方法自适应权的构成方式与 PAMF 方法相同, 不再赘述。

2.3 线性预测类 STAP 方法的本质

首先, 线性预测类 STAP 方法在确定阶数 P 后, $NK \times 1$ 维数据在阵元-脉冲域^[1]内直接降维成 $N(P+1) \times 1$ 维, 降维后经数据平滑形成数据矩阵 \mathcal{X} , 阵元-脉冲域内的降维不仅减少计算量和对样本数的要求, 更重要的是通过数据平滑还增加样本数, 在很大程度上缓解了非均匀杂波环境下样本数不足的矛盾。紧接着, 线性预测类 STAP 方法求解最优化方程得出 N 维线性预测误差滤波器的模型参数。从线性代数的观点看, 求解 N 维线性预测误差滤波器模型参数对应的最优化方程就是求解带约束的标准最小二乘问题, 其解是数据矩阵 \mathcal{X} 的 N' (PAMF 方法中 $N' = N$) 个最小奇异值对应的左奇异向量。事实上, 求解 N 维线性预测误差滤波器参数的过程与最小特征对消^[7](MNE)STAP 方法中求噪声子空间的方法相同。MNE 法最优化方程为

$$\left. \begin{aligned} & \min \mathbf{W}^H \mathbf{W} \\ & \text{s.t. } \mathbf{E}_C^H \mathbf{W} = 0, \quad \mathbf{W}^H \mathbf{S} = 1 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中 \mathbf{E}_C 表示为杂波子空间, 最优化问题的解为

$$\mathbf{W}_{\text{MNE}} = \frac{\mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{S}}{\mathbf{S}^H \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{S}} \quad (10)$$

其中 \mathbf{E}_N 表示为噪声子空间, MNE 方法是把所求权矢量约束在噪声子空间内以抑制杂波, 是一种典型的降秩 STAP 方法。线性预测类 STAP 方法求 N' (PAMF 方法中 $N' = N$) 个最小奇异值对应的左奇异向量的过程就是 MNE 方法求噪声子空间的过程。线性预测类 STAP 方法在阵元-脉冲域内降维又进行了降秩处理, 因此在本质上是一种降维降秩相结合的方法。在降维降秩处理后, 线性预测类方法把求出的 N' 维噪声子空间按照式(8)排列并最终形成自适应权, 其目的是对阵

元-脉冲域内的相应子阵输出做自相关处理以提高自适应处理性能。线性预测类方法即降维又降秩,不仅降低了计算量,而且减少了对样本数的要求,更重要的是在降维过程中,通过数据平滑还增加了样本数,因此只需要很少的距离门数据就能进行自适应处理,有较强的非均匀空时自适应处理性能。线性预测类方法的降维降秩是在定阶后完成的,因此线性预测类方法的定阶非常重要。

3 线性预测类 STAP 方法的定阶

线性预测类 STAP 方法中 N 维线性预测误差滤波器的定阶问题是一个难点问题,在已有文献[2-5]中都是利用信息论准则法求取,比较常用的信息论准则法有最终预测误差(FPE)法、AIC 准则法和 CAT(准则自回归传递)函数准则^[6]。信息论准则法需要自适应的确定阶数,因此需要较多的计算量,无法满足实时要求。如何能快速准确地定阶在线性预测类降维 STAP 方法中显得尤为重要。

在了解线性预测类 STAP 方法本质后,可知线性预测类 STAP 方法实际上是一种在阵元-脉冲域内降维降秩相结合的方法。在空时自适应信号处理理论中,为了保证降维 STAP 处理有足够的自由度抑制杂波,要求降维后系统自由度要大于杂波自由度,才能有效地抑制杂波。而降秩过程要求所选取的阶数必须保证降秩后的 N' 个奇异向量均落在噪声空间。综合降维降秩过程的要求,线性预测类 STAP 方法必须保证降维后的系统自由度大于等于杂波自由度与降秩的噪声空间维数之和。据此可得

$$N(P+1) \geq \rho + N' \quad (11)$$

其中 ρ 表示杂波自由度。线性预测类 STAP 方法的模型阶数可确定为

$$P = \left\lceil \frac{\rho + N'}{N} \right\rceil - 1 \quad (12)$$

其中 $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整函数。在式(12)中, N' 也是一个未知量,文献[5]中给出了 N' 的计算公式

$$N' = \left\lceil \frac{NK - \rho}{K - P} \right\rceil \quad (13)$$

联立解式(12)、式(13)就可确定经多维线性预测误差滤波器后的输出时间序列的维数和模型阶数。实际上,空域往往有较大的误差,因此通常不改变多维时间序列的维数,即令 $N' = N$, 此时只需利用式(12)即可确定模型阶数。

4 仿真研究

以 $N = 16$ 的等间距线阵为例进行了仿真研究,主要参数如下:脉冲数 $K = 32$, 脉冲重复频率 $f_r = 2488.9\text{Hz}$, 载机高度为 $H_p = 8\text{km}$, 载机飞行速度为 $V_p = 140\text{m/s}$, 工作波长 $\lambda = 0.225\text{m}$, 杂噪比 $\text{CNR} = 60\text{dB}$, 天线为前向阵,波束指向阵面法线。线性预测类方法性能相差不大,因此,在仿真研究中,线性预测类 STAP 方法选用输出时间序列维数为 N 的 STAR 方法为代表。

图1是线性预测类 STAP 方法模型阶数与平均改善因子的关系曲线,根据机载预警雷达杂波理论,机载雷达杂波自由度^[1] $\rho \approx N + K - 1$,按照式(12)计算出的线性预测误差滤波器的阶数 $P=3$ 。从图1中的仿真结果可以看到,本文所给出的定阶公式能准确估计实际的模型的阶数。图2为几种 STAP 方法样本数与各通道平均改善因子的关系曲线,比较的方法包括取3个通道的多通道联合自适应处理方法(3DT)、波束和多普勒通道各取有3个的局域联合处理方法(JDL)、波束和多普勒通道各取5个的广义相邻多波束法(GMB)、以及线性预测类 STAP 方法。从仿真结果可以看到,与其他方法相比,合理确定阶数后的线性预测类 STAP 方法在极少的样本数条件下也能获得稳定的性能,特别适合非均匀杂波环境。

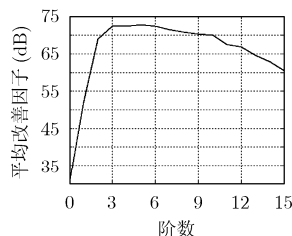


图1 模型阶数与线性预测类 STAP 方法性能关系

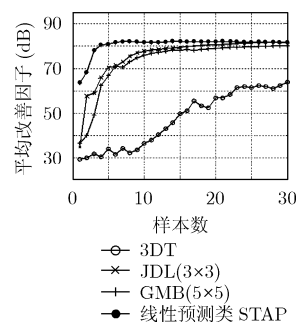


图2 几种降维 STAP 方法样本数与性能的关系

5 结束语

机载预警雷达系统所面临的真实杂波环境大多是非均匀的,进行全维空时自适应处理计算量巨大,且没有足够多的独立同分布训练样本。研究表明线性预测类 STAP 方法在本质上是一种降维降秩相结合的方法,其降维过程是在阵元-脉冲域内完成。降维降秩方法既降低了运算量,又减小了对独立同分布样本数的需求。而且在阵元-脉冲域内降维的同时还通过数据平滑在阵元-脉冲域内还能产生了额外的样本,进一步缓解了样本数的矛盾。因此,线性预测类 STAP 方法只需要很少的样本数就能获得稳定的性能,特别适合非均匀杂波环境。线性预测类 STAP 方法在阵元-脉冲域内的降维必须在准确估计滤波器阶数后完成,本文利用线性代数理论给出了滤波器的定阶公式,与已有文献提出的信息论准则定阶法相比,新的定阶方法更简便、更具工程可实现性。仿真结果验证了研究结论的正确性。

参考文献

- [1] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理. 北京: 清华大学出版社, 2000: 133-142.
Wang Yong-liang and Peng Ying-ning. Space-Time Adaptive Processing. Beijing: Tsinghua University Press, 2000:

- 133-142.
- [2] Roman J R, Rangaswamy M, and Davis D W, *et al.* Parametric adaptive matched filter for airborne radar applications. *IEEE Trans. on AES*, 2000, 36(2): 678-692.
- [3] Michels J H, Roman J R, and Himed B. Beam control using the parametric adaptive matched filter STAP approach. *IEEE Radar Conference*, Huntsville, Alabama, May 2003: 405-412.
- [4] Michels J H, Himed B, and Rangaswamy M. Evaluation of the normalized parametric adaptive matched filter STAP test in airborne radar clutter. *IEEE International Radar Conference*, Washington D.C., May 2000: 769-774.
- [5] Parker P and Swindlehurst A. Space-time autoregressive filtering for matched subspace STAP. *IEEE Trans. on AES*, 2003, 39(2): 510-520.
- [6] Scharf L L and Friedlander B. Matched subspace detectors. *IEEE Trans. on AP*, 1994, 42(8): 2146-2157.
- [7] Haimovich A M. The eigencalcr: Adaptive radar by eigenanalysis methods. *IEEE Trans. on AES*, 1996, 32(2): 532-542.
- [8] Waele S D and Broersen M T. Order selection for vector autoregressive models. *IEEE Trans. on SP*, 2003, 51(2): 427-433.
- 吴 洪: 男, 1978年生, 博士生, 从事雷达技术、自适应信号处理等方向的研究.
- 王永良: 男, 1965年生, 教授, 博士后, 博士生导师, 中国电子学会无线电分会委员, 已发表论文130多篇, 收入三大检索60多篇, 出版《空时自适应信号处理》、《空间谱估计理论与算法》专著两部, 曾获教育部“全国青年教师奖”和人事部“中国优秀博士后奖”, 入选新世纪百千万人才工程国家级人选, 主要研究方向为雷达技术、阵列信号处理、自适应信号处理等.
- 陈建文: 男, 1964年生, 教授, 博士后, 硕士生导师。IEEE会员, 中国电子学会高级会员, 已发表学术论文40多篇, 其中被SCI、EI、ISTP收录的有27篇, 合作编著《现代数字信号处理》, 主要从事雷达信号处理、阵列信号处理、雷达成像与目标识别等方面的研究工作.