

基于多级维纳滤波器的非均匀 $\Sigma\Delta$ -STAP 研究

沈明威 朱岱寅 朱兆达

(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

摘要: 该文提出了基于多级维纳滤波器的非均匀 $\Sigma\Delta$ -STAP 并行块处理算法,在非均匀环境下能快速有效检测动目标。文中基于多级维纳滤波的广义旁瓣对消器结构,提出了联合主波束检测和自适应功率剩余检测的两级级联非均匀检测算法,能有效增强对弱干扰目标样本的检测能力。同时,将改进的并行块处理引入非均匀 $\Sigma\Delta$ -STAP 算法,极大地降低了系统运算量。理论分析和仿真实验表明,该算法能有效剔除干扰样本,提高动目标检测性能,收敛速度快,运算量小,鲁棒性强,易于工程实施。

关键词: 和差波束; 多级维纳滤波器; 非均匀检测; 空时自适应处理

中图分类号: TN911.7, TN951

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)06-1308-04

Study on $\Sigma\Delta$ -STAP in Nonhomogeneous Environment Based on Multistage Wiener Filter

Shen Ming-wei Zhu Dai-yin Zhu Zhao-da

(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In this paper, an efficient and robust $\Sigma\Delta$ -STAP algorithm for moving targets detection in nonhomogeneous environment is investigated, which is implemented based on Multistage Wiener Filter (MWF). For culling the training data, a two stages hybrid nonhomogeneous detection algorithm is proposed. Based on the general sidelobe canceller structure of MWF, the training data can be firstly censored by the mainbeam output and then followed by the Adaptive Power Residual(APR) detection. In addition, the modified Concurrent Block Processing(CBP) is introduced into the $\Sigma\Delta$ -STAP algorithm, which can significantly reduce the computational load. Theoretical analysis and simulation results are presented to demonstrate that, the aforementioned approach can effectively detect the outliers and improve the targets detection performance. This approach has the advantage of fast convergence, low computation load, and good robustness, which is feasible for engineering application.

Key words: $\Sigma\Delta$ -beam; Multistage Wiener filter; Nonhomogeneous detection; STAP

1 引言

Brennan 和 Reed 首先将阵列处理的基本思想推广到脉冲和阵元采样的两维场,提出了空时自适应处理(STAP)的概念和理论^[1],并指出两维联合处理的性能大大优于常规的空时级联处理。但是进行全空时域的自适应处理,其设备量和计算量均十分惊人。此后,研究热点主要集中在能够实时实现的准最优处理方法^[2-4]。90年代中期,美国相继实施了 Mountain Top 和 MCARM 计划,录取了大量机载雷达实测数据。基于这些实测数据,开展了大量的研究工作。Brown 等对实测和差波束数据采用 STAP($\Sigma\Delta$ -STAP)算法^[5]后,取得了令人满意的动目标检测性能。 $\Sigma\Delta$ -STAP 空域自由度仅为 2,系统自由度低,是当前工程条件下,最为可行的实时处理方案。

机载雷达工作在各种非均匀环境中,当训练样本中存在与检测动目标相似的干扰目标时,目标检测性能急剧恶

化^[6,7]。为了减少干扰目标引起的性能损失,1997年 Melvin 等提出了采用非均匀检测器(NHD)来剔除那些包含干扰目标的训练样本,进而改善对杂波协方差矩阵的估计^[8]。但非均匀检测进一步减少了训练样本,实用的 STAP 算法必须能在小训练样本下,快速收敛到正确权值。

多级维纳滤波器(MWF)是一种新型的滤波器结构^[9]。MWF 无需估计协方差矩阵,其收敛速度优于主特征值法和互谱尺度法,是目前收敛速度最快的降秩 STAP 算法^[10]。因此,本文基于多级维纳滤波器,研究实际非均匀环境下能快速、有效检测动目标的实用 $\Sigma\Delta$ -STAP 算法。

本文第 2 节建立和差波束机载雷达的信号模型,第 3 节介绍 MWF 原理;第 4 节研究基于 MWF 的两级级联干扰目标检测算法;第 5 节将改进的并行块处理(CBP)引入基于 MWF 的非均匀 $\Sigma\Delta$ -STAP 算法,进一步降低系统运算量;第 6 节通过仿真实验,研究分析基于 MWF 的非均匀 $\Sigma\Delta$ -STAP 并行块处理算法的动目标检测性能;最后给出全文结论。

2 信号模型

雷达用和方向图 $\Sigma(\theta)$ 发射信号, 同时分别用和方向图 $\Sigma(\theta)$ 与差方向图 $\Delta(\theta)$ 接收信号。假定杂波平均径向速度已由时间平均杂波相干机载雷达(TACCAR)技术^[11]进行补偿。

设 $S_{\Sigma}(k)$, $S_{\Delta}(k)$ 分别表示第 k 个脉冲和差通道接收的动目标回波信号。假设动目标偏离波束中心的水平方位角为 θ_s , 运动引起的多普勒频率为 f_{dc} , 则

$$\left. \begin{aligned} S_{\Sigma}(k) &= \frac{1}{R_i^2} \gamma_{\theta_s} \Sigma(\theta_s)^2 e^{j(k-1) \frac{2\pi f_{dc}}{f_r}} \\ S_{\Delta}(k) &= \frac{1}{R_i^2} \gamma_{\theta_s} \Delta(\theta_s) \Sigma(\theta_s) e^{j(k-1) \frac{2\pi f_{dc}}{f_r}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 f_r 为脉冲重复频率(PRF); R_i 为雷达斜距, γ_{θ_s} 为动目标雷达复反射系数。

由图 1 的几何关系, 和差通道接收的杂波信号为

$$\left. \begin{aligned} C_{\Sigma}(k) &= \frac{1}{R_i^2} \int_0^{\pi} \gamma_{\theta} \Sigma(\theta)^2 e^{j(k-1) \frac{4\pi V}{\lambda f_r} \sin \theta \cos \varphi_l} d\theta \\ C_{\Delta}(k) &= \frac{1}{R_i^2} \int_0^{\pi} \gamma_{\theta} \Delta(\theta) \Sigma(\theta) e^{j(k-1) \frac{4\pi V}{\lambda f_r} \sin \theta \cos \varphi_l} d\theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 θ 为偏离波束中心的水平方位角; φ_l 为高低角。 V 表示载机速度; λ 为雷达工作波长。 γ_{θ} 为杂波散射单元复反射系数。那么和差通道在第 k 个脉冲接收的回波信号为

$$\left. \begin{aligned} X_{\Sigma}(k) &= S_{\Sigma}(k) + C_{\Sigma}(k) + N_{\Sigma}(k) \\ X_{\Delta}(k) &= S_{\Delta}(k) + C_{\Delta}(k) + N_{\Delta}(k) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 $N_{\Sigma}(k)$ 、 $N_{\Delta}(k)$ 为和差通道系统噪声。

3 多级维纳滤波器原理

MWF 是基于广义旁瓣对消器(GSC)结构实现的。GSC 是将接收信号 X 投影到 S 和 B 这一对正交子空间, 其中 S 为检测目标归一化空时导引矢量。如果变换矩阵 $T=[S \ B]$ 为满秩非奇异矩阵, 则在变换域内其性能保持不变。MWF 分解就是利用一系列的正交子空间变换进行逐级分解, 分解的过程类似于用一个 T 矩阵将输入信号转化到 GSC 处理器的过程^[9, 10]。图 2 为 MWF 一级分解示意图。接收信号 X 在 S 和 B 上的投影分别为 d_0 和 X_0 。对 X_0 进一步分解, 设新的变换矩阵 $T_1=[H_1 \ B_1]$, 新的变换域数据为 $Z_1 = T_1^H X_0 = (d_1 \ X_1)^T$ 。式中

$$H_1 = r_{x_0 d_0} / \sqrt{r_{x_0 d_0}^H r_{x_0 d_0}} \quad (4)$$

H_1 为 X_0 与 d_0 的归一化互相关矢量。 B_1 为阻塞矩阵, 它的列矢量形成 H_1 零空间的正交基, 即 $B_1^H H_1 = 0$ 。同理, 由于 T_1 是非奇异的, 因此滤波器性能不变。

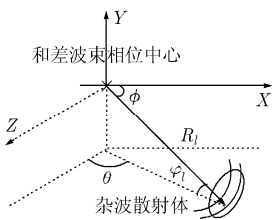


图 1 和差波束几何关系

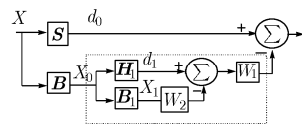


图 2 维纳滤波器一级分解示意图

那么, Z_1 与 d_0 新的互相关矢量为

$$r_{z_1 d_0} = E[Z_1 d_0^H] = T_1^H r_{x_0 d_0} = [\delta_1 \ 0 \cdots \ 0] \quad (5)$$

式中 $\delta_1 = H_1^H r_{x_0 d_0} = \|r_{x_0 d_0}\|$ 。

式(5)表明在变换域中互相关矢量只含有一个非零的元素, 即变换域数据 Z_1 中只有 d_1 和 d_0 是相关的, 而 X_1 与 d_0 统计独立, 这是多级分解的关键之处。维纳滤波器可以逐级分解, 直至最后一级的输出为标量为止。此时, 一个高维的矢量权求解过程已分解成求解若干个标量权系数。

降秩 MWF 就是将多级分解进行简单的截断。多级维纳滤波器分解按 d_{i+1} 与 d_i 互相关系数最大准则, 将从 X_0 估计 d_0 最有用的信息置于最前级, 因此收敛性能优于基于特征分解的降秩算法。 $\Sigma\Delta$ -STAP 采用降秩 MWF, 能极大降低训练样本数及系统运算量。

文献[12]指出, 在小训练样本条件下, 可以将对角加载技术引入 MWF(DL-MWF), 进一步提高降秩 MWF 维数选择的鲁棒性。考虑实际非均匀环境下, 独立同分布样本数极少, 本文采用降秩 DL-MWF 计算自适应权值。

4 两级级联干扰目标检测算法

机载雷达的杂波环境是极度不均匀的。当训练样本中存在与检测动目标相似的干扰目标时, 自适应计算的权矢量将抑制目标信号, 从而导致系统输出信杂比急剧下降, 动目标检测概率降低。Melvin 等研究了非均匀检测与 STAP 相结合的方法, 提出了广义内积(GIP)、自适应功率剩余(APR)等非均匀检测算法^[7, 8], 以改进非均匀环境中训练样本的选取。

当训练样本中存在强干扰目标时, 基于 GIP 和 APR 的 NHD 对干扰目标的识别性能急剧恶化, 无法剔除包含弱干扰目标的训练样本^[13]。文献[13]提出循环检测不断剔除干扰目标的 APR 检测算法, 运算量极大。本文结合多级维纳滤波器的 GSC 结构, 提出两级级联的干扰目标检测算法, 其原理框图如图 3 所示。

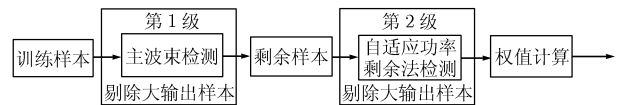


图 3 两级干扰目标检测算法

多级维纳滤波器是基于 GSC 结构的, 在检测方向形成主波束, 因此首先进行主波束检测。假设检测目标的归一化空时导引矢量为 S , 则各训练样本在主波束的输出功率为

$$d_0^i = |S^H X_i|^2 \quad (6)$$

X_i , d_0^i 分别是第 i 个样本的空时采样信号和主波束检测量。主波束检测实质是对参考样本进行空时二维相干积累, 它能反映训练样本在检测波束中信号的强度, 但受杂波剩余功率影响较大。因此, 主波束检测只能剔除强干扰样本。

对剩下的训练样本, 采用 APR 检测算法, 进一步剔除

包含弱干扰目标的参考单元。那么第 i 个样本的 APR 为

$$APR_i = \left| S^H \tilde{R}^{-1} X_i \right|^2 \tag{7}$$

\tilde{R} 为由剩余样本估计的杂波协方差矩阵。考虑算法的收敛性及并行性，我们可采用对角加载的采样矩阵求逆法(LSMI)计算各参考样本的检验统计量 APR_i 。基于多级维纳滤波器的非均匀 $\Sigma\Delta$ -STAP 算法采用两级非均匀检测算法能有效剔除包含强、弱干扰目标的参考单元，但运算量显著小于循环检测 APR 算法。

5 改进的并行块处理

STAP 通常采用滑窗处理法(SWP)，逐距离单元计算自适应权值，因此系统运算量极大。Gerlach 提出了并行块处理算法^[14]，即通过循环 APR 检测算法将若干相邻检测单元与训练单元分为杂波单元与目标单元，由杂波单元计算自适应权值对目标单元进行检测。该算法运算量大，同时对弱目标检测能力不足。

并行块处理算法的核心思想是相邻若干个检测单元估算一个自适应权值进行目标检测，从而有效降低 STAP 的运算复杂性和系统运算量。考虑到两级非均匀检测有效删除了干扰样本单元，因此无需在检测单元两侧留取保护单元，本文改进了并行块处理算法。基于多级维纳滤波器的非均匀 $\Sigma\Delta$ -STAP 并行块处理算法流程如图 4 所示。

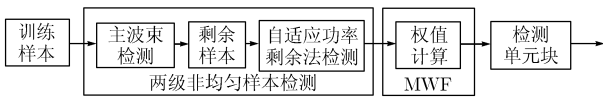


图 4 基于多级维纳滤波器的非均匀 $\Sigma\Delta$ -STAP 并行块处理算法流程图

基于多级维纳滤波器的非均匀 $\Sigma\Delta$ -STAP 并行块处理算法对训练样本进行两级非均匀检测，剔除干扰目标样本，进而估计降秩多级维纳滤波器权系数，然后用确定的权系数对检测单元块进行检测。假设检测单元块包含 N 个检测单元。那么采用并行块处理， N 个检测单元只需计算一个自适应权值，极大地降低了系统运算复杂度。考虑实际雷达环境中，杂波统计特性随距离变化，检测单元块不宜取得太大。

6 仿真结果及分析

雷达系统仿真参数如下：和差波束天线方向图独立设计，如图 5 所示，差波束相位与和波束正交。雷达工作波长 $\lambda = 0.73\text{m}$ ，载机高度 $H = 10\text{km}$ ，作用距离 $R = 400\text{km}$ 。天线波束正侧视，脉冲重复频率 $PRF=360\text{Hz}$ ，载机速度 $V = 150\text{m/s}$ ，系统杂噪比 $CNR = 50\text{dB}$ 。

$\Sigma\Delta$ -STAP 相干处理的时域脉冲数 $K=16$ ，系统自由度为 32。定义系统改善因子(IM)为输出信杂噪比与输入信杂噪比的比值。图 6 为理想条件下 $\Sigma\Delta$ -STAP 采用 MWF 算法的 IM 随滤波器维数的变化曲线。可见，MWF 的收敛速度

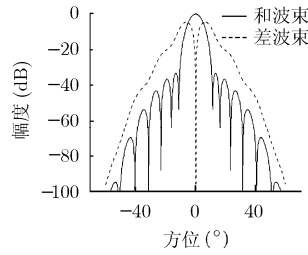


图 5 和差波束天线方向图

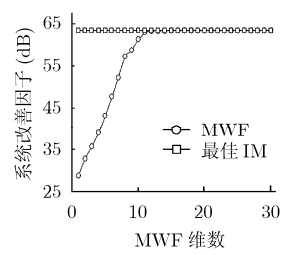


图 6 MWF 系统改善因子与维数关系

极快，当滤波器维数为 12 时已接近全空时最优处理。考虑实际非均匀环境下，独立同分布样本数极少，图 7 为训练样本数为 32 时，IM 随滤波器维数变化曲线。由于训练样本数较少，MWF 在维数为 13 时性能最优。高维 MWF 并不能收敛到正确权值，系统改善因子反而下降。而 DL-MWF 即使在小样本数情况下，高维 DL-MWF 也能收敛到正确权值，有效提高小样本条件下滤波器维数选择的鲁棒性。本文在以下仿真实验中，都采用 DL-MWF 计算自适应权值，同时 DL-MWF 维数取为 14。

以下通过 Monte Carol 仿真实验来验证基于多级维纳滤波器的非均匀 $\Sigma\Delta$ -STAP 并行块处理算法对干扰目标的检测性能。图中曲线都是 2000 次独立实验的平均值。MWF 收敛速度极快，大大降低了训练样本。仿真中取 60 个距离单元，中心 20 个距离单元为检测单元块，其余 40 个单元作为训练样本，用于估计自适应权值。第 5，55 距离单元各加入一个信杂噪比(SCNR)为 -10dB 的强干扰目标，第 12，18，48 个距离单元各加入一个 $\text{SCNR}=-35\text{dB}$ 的弱干扰目标。图 8 为采用 APR 检测算法的输出统计量，由于强干扰样本用于权值计算，因此无法识别 $\text{SCNR}=-35\text{dB}$ 的弱干扰目标，但强干扰目标能被清晰地检测出来。图 9 为对参考样本进行两级非均匀检测后的输出统计量。图 9(a)为主波束检测后输出统计量。正如前面分析，主波束检测受杂波剩余功率影响较大，只能检测 $\text{SCNR}=-10\text{dB}$ 强干扰目标。图 9(b)为主波束检测剔除大干扰样本后，采用 APR 检测算法的输出统计量。此时包含弱干扰目标参考单元的检测统计量比杂波参考单元输出大 12dB，可以很清晰地识别出来。图 8、图 9 不包括中心检测距离单元。可见，采用两级级联的非均匀检测算法能有效检测强、弱干扰目标样本。

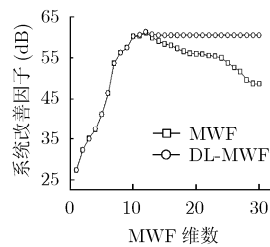


图 7 小样本下系统改善因子与维数关系

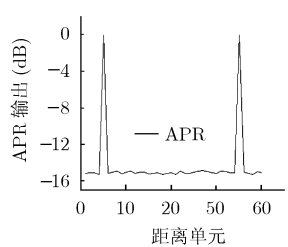


图 8 APR 非均匀检测输出统计量

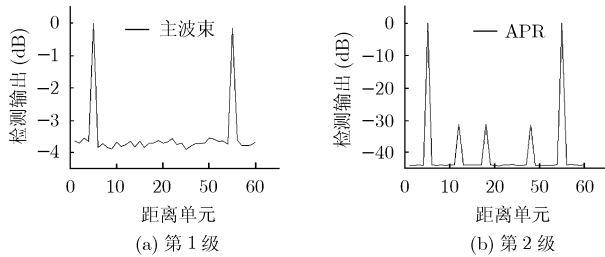


图 9 两级级联的非均匀检测输出统计量

下面我们进一步来研究基于多级维纳滤波器的非均匀 $\Sigma\Delta$ -STAP 并行块处理算法的动目标检测能力。在第 25、30、35 距离单元各存在一个检测目标，其输入 SCNR 分别为 -35dB 、 -45dB 、 -55dB 。图 10(a)为采用 APR 非均匀检测剔除强干扰样本进而估计 MWF 权系数的各检测单元滤波输出；图 10(b)为采用两级非均匀检测剔除强、弱干扰样本进而估计 MWF 权系数的各检测单元滤波输出。图中同时画出了单次独立实验结果和 2000 次独立实验结果平均值。

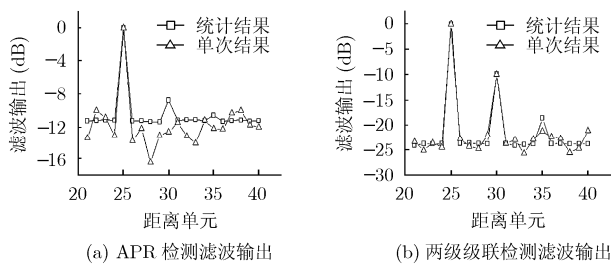


图 10 检测单元 MWF 滤波输出

由于训练样本中存在干扰目标将导致信号相消。图 10(a)表明，训练样本中存在 3 个 $\text{SCNR}=-35\text{dB}$ 的干扰目标时，自适应权值对杂波抑制不足，检测能力下降，单次实验只能检测 $\text{SCNR}=-35\text{dB}$ 的动目标。当训练样本中不含干扰目标时，MWF 能很好地抑制杂波，单次实验可以清晰地检测 -45dB 的目标。在本文给定参数下，分析统计平均结果可知，两级非均匀检测算法进一步剔除弱干扰目标样本后，MWF 的系统改善因子提高了 11.12dB 。

仿真实验中，并行块处理大小为 20 个检测单元。相对滑窗处理法，系统运算量下降了约 20 倍。理论分析与仿真实验表明，基于多级维纳滤波器的非均匀 $\Sigma\Delta$ -STAP 并行块处理算法收敛速度快，运算量小，鲁棒性强，能有效剔除强、弱干扰目标样本，显著提高动目标检测性能。

7 结束语

本文研究非均匀环境下能快速、有效检测动目标的 $\Sigma\Delta$ -STAP 算法，提出了基于多级维纳滤波器的非均匀 $\Sigma\Delta$ -STAP 并行块处理算法。该算法基于多级维纳滤波器的 GSC 结构，采用主波束检测级联 APR 检测的两级非均匀检测算法，能有效剔除非均匀干扰目标样本。同时，对检测单

元采用并行块处理，极大地降低了系统运算量。理论分析和仿真实验结果表明，该算法收敛速度快，运算量小，鲁棒性强，是当前工程条件下较为可行的实时处理方案。

参考文献

- [1] Brennan L E, Mallet J D, and Reed I S. Theory of adaptive radar. *IEEE Trans. on AES*, 1973, 9(2): 237-251.
- [2] Klemm R. Principles of Space-Time Adaptive Processing. The Institution of Electrical Engineers, London, 2002: 151-291.
- [3] Melvin M L. A STAP overview. *IEEE Aerospace and Electronic System Magazine*, 2004, 19(1): 19-35.
- [4] Haimovich A. The eigencanceler: Adaptive radar by eigenanalysis methods. *IEEE Trans. on AES*, 1996, 32(2): 532-542.
- [5] Brown R D, Wicks M C, and Wang H, et al. Stap for clutter suppression with sum and difference beams. *IEEE Trans. on AES*, 2000, 36(2): 634-661.
- [6] Melvin W L and Wicks M C. Improving practical space-time adaptive radar. 1997 IEEE National Radar Conf., Syracuse, New York, 1997: 48-53.
- [7] Blunt S D and Gerlach K. Efficient robust AMF using the FRACTA algorithm. *IEEE Trans. on AES*, 2005, 41(2): 537-548.
- [8] Little M O and Berry W P. Real-time multichannel airborne radar measurements. 1997 IEEE National Radar Conf., Syracuse, New York, 1997: 138-142.
- [9] Goldstein J S, Reed I S, and Zulch P A, et al. A multistage STAP CFAR detection technique. 1998 IEEE National Radar Conf., Dallas, TX, 1998: 111-116.
- [10] Goldstein J S, I Reed S, and Zulch P. A multistage partially adaptive STAP CFAR detection algorithm. *IEEE Trans. on AES*, 1999, 35(2): 645-662.
- [11] Skolnik M I. Radar Handbook. Second Edition, New York: McGraw-Hill, 1990.
- [12] Hiemstra J D and Goldstein J A. Robust rank selection for the multistage wiener filter. ICASSP, 2002: 2929-2932.
- [13] Gerlach K. Outlier resistant adaptive matched filtering. *IEEE Trans. on AES*, 2002, 38(3): 885-901.
- [14] Gerlach K, Blunt S D, and Picciolo M L. Robust adaptive matched filter using the FRACTA algorithm. *IEEE Trans. on AES*, 2004, 40(3): 929-945.

沈明威: 男, 1981 年生, 博士, 研究方向为动目标检测和雷达信号处理。

朱岱寅: 男, 1974 年生, 副研究员, 研究方向为雷达成像和信号处理。

朱兆达: 男, 1939 年生, 教授、博士生导师, 主要研究方向为雷达信号检测与处理。