

机载雷达的预滤波直接数据域算法¹

董瑞军 保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘 要 空时自适应处理 (STAP) 作为一种地杂波环境下机载雷达自适应检测小目标的方法已得到广泛研究, 干扰非一致性是当前的重要方面。由杂波脊外的强干扰 (或目标) 引起的分立非一致性是市区和尖峰状杂波环境下 STAP 性能下降的主要原因。利用级联算法得到的自适应权可用于 STAP 干扰的分立非一致性问题。该方法由一个直接数据域算法和一个统计自适应算法级联构成。该文提出一种带杂波衰减预滤波器的直接数据域算法来增强算法对分立非一致干扰的抑制, 从而提高了 STAP 对付分立非一致干扰的性能。

关键词 非一致干扰, STAP, 预滤波器, 直接数据域算法

中图分类号 TN951

1 引言

空时自适应处理 (STAP) 作为抑制强的动态杂波的最理想方法已得到广泛研究。实际的机载雷达数据表明, 干扰具有非一致性。这使干扰协方差矩阵的估计和自适应权的计算变得更加复杂。非一致性可分为两类: 一类是样本基中包含了待检测主距离单元中没有的干扰; 另一类是待检测主距离单元中包含了样本基中没有的干扰。前者可以用一个非一致性检测器 (NHD) 来识别没有反映主数据统计特性的辅助数据单元并加以剔除^[1,2]。然而, 这些 NHD 没有说明如何检测被确定为非一致距离单元中的目标。相邻距离单元不拥有关于其非一致性的信息, 因此统计算法不能抑制待检测主距离单元中的分立干扰。这种干扰需应用直接数据域算法加以抑制。本文研究的正是这样一种对付主距离单元中分立干扰的自适应算法。

实际上, 本文提出的直接数据域算法也可以理解为一种特殊的降维算法, 它也同样是将接收到的数据投影到一个较低维的空间中去处理。但与一般降维不同的是, 一般降维考虑的是降维后如何最大限度地保持对一致杂波的抑制能力, 而直接数据域算法还要考虑降维后如何最大限度地减少分立干扰的影响。

本文分 4 节。第 2 节简要描述了机载雷达 STAP 问题和本文提出的预滤波非统计算法的原理, 第 3 节通过仿真比较了该算法和已有算法^[3]的性能, 最后在第 4 节给出了结论。本文表明这种新方法具有比文献 [3] 中算法更优越的分立干扰抑制性能。

2 预滤波空时联合直接数据域算法

统计 STAP 算法有效的条件之一就是检测距离门中的干扰特性与样本基中的一致, 因此在对付在样本基中没有出现而在检测距离门中出现的非一致干扰时, 必须使用非统计或直接数据域算法。

对于等距无向点形阵元组成的线阵, 接收到的数据可写成 $K \times N$ 的矩阵 X , 其元素 X_{kn} 代表第 n 个阵元在第 k 个脉冲下的回波。信号矩阵是 $K \times N$ 的矩阵, 它由空间形成的波束 (用 DBF) 和时域的窄带多普勒滤波 (用 DFT) 所构成, 若两个向量分别为

$$S_s(\psi_0) = [1, e^{j\varphi_s(\psi_0)}, \dots, e^{j(N-1)\varphi_s(\psi_0)}]^T, \quad S_t(f_0) = [1, e^{j\varphi_t(f_0)}, \dots, e^{j(K-1)\varphi_t(f_0)}]^T \quad (1)$$

式中 $\varphi_s(\psi)$ 和 $\varphi_t(f)$ 分别为阵元间和脉冲间在相应 ψ 和 f 时的角相移。由此, 信号矩阵 S 为

$$S = S_t(f_0)S_s^T(\psi_0) \quad (2)$$

¹ 2000-10-20 收到, 2001-05-08 定稿

我们提出如下的直接数据域算法: 首先进行预滤波滤除一致杂波, 然后再滤除分立干扰。抑制主杂波的预滤波器是较常见的^[4,5], 此时零点频率是固定的, 本文的预滤波器是根据杂波协方差矩阵 R 自适应工作的。在本文中, 假定一致杂波协方差矩阵 R 已知 (实时估算或依靠先验知识)。

文献 [3] 中的级联算法由一个直接数据域算法和一个统计自适应算法级联构成。直接数据域算法滤除分立干扰, 统计自适应算法滤除一致杂波。可见, 滤除一致杂波并不需要直接数据域算法完成。计算直接数据域算法权时一致杂波 (尤其是主杂波等较强的杂波) 的存在会使直接数据域算法在对付分立干扰的同时又要对付一致杂波, 从而削弱了对分立干扰的抑制。因此, 我们设计一个预滤波器来滤除一致杂波, 以期得到更佳的分立干扰抑制性能。为了在预滤波后利用信号矩阵的特殊形式滤除分立干扰, 我们的预滤波器如下。首先确定一满秩波束变换矩阵 $T = [t_1 \ t_2 \ \cdots \ t_{KN-1} \ S(:)]$, 其中 $S(:) = \text{reshape}(S, KN, 1) = [S_f^T(f_0) \ e^{j\varphi_s(\psi_0)} S_f^T(f_0) \ \cdots, e^{j(N-1)\varphi_s(\psi_0)} S_f^T(f_0)]^T$ (对于任意包含 mn 个元素的矩阵 A , $\text{reshape}(A, m, n)$ 表示一个 $m \times n$ 的矩阵, 它的元素是从 A 中按列取出的, 如上所示), $t_1, t_2, \dots, t_{KN-1}$ 是 $S(:)$ 补空间的任意一组基, 本文选用的是傅氏基, 计算杂波能量 $D = 10 \log_{10}(\text{diag}(T^H R T))$ 。按 D 将 T 分为两部分: 噪声子空间 $T_1 = [t_I \ S(:)]$ 和杂波子空间 $T_2 = [t_I]$, 其中 $I = \{i | 1 \leq i \leq KN-1, D(i) < \alpha\}$, $I^c = \{i | 1 \leq i \leq KN-1, D(i) \geq \alpha\}$, α 为一适当常数。然后将待检测的主数据 $X_0(:)$ 向两子空间投影, 保留噪声子空间的投影, 而将杂波子空间的投影置零, 再反变换回去, 就实现了衰减杂波的预滤波, 预滤波后的数据为

$$X'_0 = \text{reshape}(T_1 T_1^H X_0(:), K, N) \quad (3)$$

下面讨论分立干扰滤除算法。文献 [3] 中的滤除算法是空时级联的, 而我们的算法是空时联合处理的。由信号矩阵可以看出, 信号沿对角线方向相差一个恒定相位 $e^{j\varphi_s(\psi_0)} e^{j\varphi_t(f_0)}$ 。因此, 利用 $X_{kn} - e^{-j\varphi_s(\psi_0)} e^{-j\varphi_t(f_0)} X_{(k+1)(n+1)}$ 就可以把信号分量对消掉。定义

$$C = X'_0(1:K-1, 1:N-1) - e^{-j\varphi_s(\psi_0)} e^{-j\varphi_t(f_0)} X'_0(2:K, 2:N),$$

则此 $(K-1) \times (N-1)$ 矩阵仅由干扰项组成。直接数据域自适应权为下面的优化问题的解。

$$\max_{\|w\|_2=1} w^H [a_{(K-1)(N-1)} a_{(K-1)(N-1)}^H - C(:)C(:)^H] w \quad (4)$$

其中

$$a_{(K-1)(N-1)} = \text{reshpae}(S(1:K-1, 1:N-1), (K-1)(N-1), 1) \quad (5)$$

上述优化问题的解是矩阵 $a_{(K-1)(N-1)} a_{(K-1)(N-1)}^H - C(:)C(:)^H$ 的最大特征值。由此得到的 w 是 $(K-1)(N-1)$ 维的向量, 而 KN 维的自适应权为

$$W = \text{reshape} \left(\begin{bmatrix} \text{reshape}(w, K-1, N-1) & \text{zeros}(K-1, 1) \\ \text{zeros}(1, N-1) & 0 \end{bmatrix}, KN, 1 \right) \quad (6)$$

使用上述直接数据域算法, 后面要级联统计 STAP 算法, 这样才能兼具直接数据域方法与统计方法的优势。级联时, 将直接数据域算法得到的权看作是对给定方向和多普勒的一个变换向量, 在方向-多普勒域选取一局部处理域, 构造如 (7) 式的变换矩阵, 统计算法在变换域自适

应地处理空时数据。其它细节参见文献 [3]。

$$T_W^H = \begin{bmatrix} W(\psi_{-1}, f_{-1})^H \\ W(\psi_{-1}, f_0)^H \\ W(\psi_{-1}, f_1)^H \\ W(\psi_0, f_{-1})^H \\ W(\psi_0, f_0)^H \\ W(\psi_0, f_1)^H \\ W(\psi_1, f_{-1})^H \\ W(\psi_1, f_0)^H \\ W(\psi_1, f_1)^H \end{bmatrix} \quad (7)$$

3 仿真研究

所有仿真实验均针对一 10 列的矩形阵, 因此 $N = 10$ 。其它参数为相干脉冲数 $K = 16$, 平均杂噪比 $\text{CNR} = 60\text{dB}$, 波束指向 110° 。比较了 3 种方案: 已有算法 [3] (算法 A)、我们提出的直接数据域算法 (算法 B) 和用本文的直接数据域算法给出的级联算法 (算法 C)。

在预处理过程中, 要分解杂波子空间与白噪声子空间, 其分解门限 α 若过大, 则预滤波后仍然存在比分立干扰强的杂波分量, 影响分立干扰的抑制; 分解门限 α 若过小, 则不仅杂波分量被滤除, 某些白噪声分量也会被滤除掉, 分立干扰滤波器对从这些白噪声分量所在的方向进入的分立干扰无法形成零陷。在本文, 算法 B 和算法 C 中白噪声子空间的最大能量为 28.38dB 。

本文给出的自适应天线方向图是 200 次独立实现的平均方向图。仿真包括了杂波、白噪声和一个分立干扰的作用。分立干扰由一个 40dB 的目标模拟。考虑了两种情况。第一种情况下, 分立干扰多普勒频率与检测多普勒频率相同, 但方位不同; 第二种情况下, 分立干扰方位与检测方位相同, 但多普勒频率不同。图 1 是第一种情况下 3 种算法在检测多普勒上的天线方向图。图 2 是第二种情况下 3 种算法在检测方位上的天线方向图。由天线方向图可以估算出分立干扰的输出功率, 如图 1(a) 在分立干扰处形成的零点不足 -10dB , 分立干扰输出在 30dB 以上, 检测虚警概率极大。我们的直接数据域算法能够在分立干扰处形成更深的零点。但它并未抑制一致杂波, 而级联统计 STAP 后则兼备了二者的优点, 在杂波和干扰处均形成了较深的零点。图 1、2 的结果说明了本文算法的优势。

顺便指出, 本文图 1(a) 和图 2(a) 表示算法 A 的分立干扰抑制效果比文献 [3] 中同样算法的抑制效果差得多, 本文图 1(a) 和图 2(a) 基本上不分瓣。这是由于本文副瓣杂波强的缘故。即使 CNR 降至 30dB , 算法 C 仍然优于算法 A。

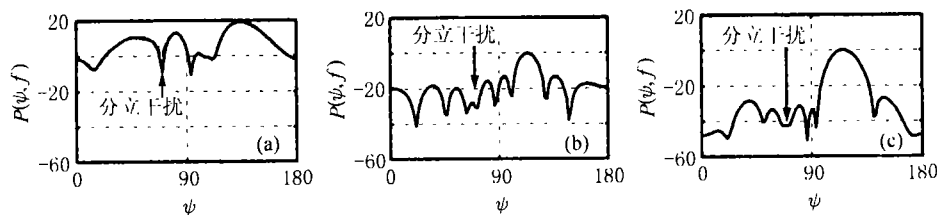


图 1 在检测多普勒上的天线方向图
(a) 算法 A, (b) 算法 B, (c) 算法 C

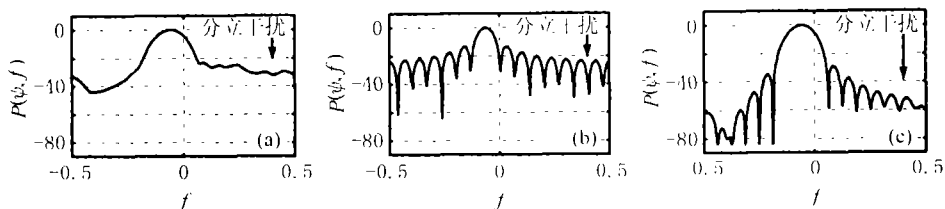


图2 在检测方位上的天线方向图。(a) 算法 A, (b) 算法 B, (c) 算法 C

4 结 论

在本文中, 我们提出了一种新的两维非统计 STAP 方法抑制分立干扰, 其后续二级统计自适应处理抑制一致杂波。由杂波脊外的强干扰 (或目标) 引起的分立非一致性是市区和尖峰状杂波环境下 STAP 性能下降的主要原因。理论分析和仿真证明, 将分立干扰和一致杂波隔离处理, 得到的直接数据域算法能够更好地抑制分立干扰。

参 考 文 献

- [1] R. S. Adve, M. C. Wicks, T. B. Hale, P. Antonik, Ground moving target indication using knowledge based space time adaptive processing, Proc. of the 2000 IEEE Int. Radar Conf., Alexandria, May 2000, 735-740.
- [2] W. L. Melvin, M. C. Wicks, Improving practical space-time adaptive radar, Proc. of the 1997 IEEE National Radar Conf., Syracuse, May 1997, 48-53.
- [3] R. S. Adve, T. B. Hale, M. C. Wicks, A two stage hybrid space-time adaptive processing algorithm, Proc. of the 1999 IEEE Radar Conf., Boston, April 1999, 279-284.
- [4] B. C. Armstrong, H. D. Griffiths, C. J. Baker, R. G. White, Performance of adaptive optimal Doppler processors in heterogeneous clutter, IEE Proc.-F, 1995, 142(4), 179-190.
- [5] 保铮, 张玉洪, 廖桂生, 王永良, 吴仁彪, 机载雷达空时二维信号处理, 现代雷达, 1994, 16(1), 38-48, 16(2), 17-27.

DIRECT DATA DOMAIN STAP ALGORITHM FOR AIRBORNE RADAR APPLICATIONS

Dong Ruijun Bao Zheng

(Key Lab. for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract STAP has been widely studied for airborne radar as an approach to adaptively detect small target competing with ground clutter. Non-homogeneous interference is currently an important aspect of STAP. The discrete non-homogeneous due to strong interference or target separating from clutter ridge account for much of the degradation in urban and spiky clutter scenarios. The use of adaptive weights with the hybrid algorithm is widely applicable to discrete non-homogeneity problems, which is a hybridization of a two-dimensional non-statistical method with statistically based methods. This paper further considers a new direct data domain processor with a prefilter attenuating clutter to strengthen suppression for discrete non-homogeneous interference. By that, the desirable performance of STAP to discrete non-homogeneous interference is observed.

Key words Non-homogeneous interference, STAP, Prefilter, Direct data domain algorithm

董瑞军: 男, 1971 年生, 讲师, 博士生, 主要研究方向有: 模糊控制, 模糊辨识及雷达信号处理等。

保 铮: 男, 1927 年生, 教授, 中国科学院院士和中国电子学会会士。主要研究方向为雷达信号处理。