

稳健的局域 STAP 处理器

范西昆^{1,2}, 王永良²

(1. 国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073;

2. 空军雷达学院兵器运用工程军队重点实验室, 湖北武汉 430019)

摘要: 针对现有局域空时自适应(STAP)处理器的不足,提出了一种对杂波复杂度和干扰环境变化更加稳健的局域 STAP 处理器—FDSP (Flexible DOF STAP Processor). 该处理器根据外部干扰环境的变化情况,依据准则自适应地调整系统自由度. 它不仅降低了非主杂波区杂波抑制的计算量,并且可以有效抑制有源干扰. 给出了该处理器的实现方法和权值递推求解的快速算法. 利用实测数据证明了该处理器的有效性.

关键词: 杂波抑制; 干扰抑制; STAP; 自由度

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12-2195-05

Robust Localized STAP Processor

FAN Xi-kun^{1,2}, WANG Yong-liang²

(1. School of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha, Hunan 410073, China;

2. Key Research Lab of Wuhan Radar Institute, Wuhan, Hubei 430019, China)

Abstract: A robust localized space time adaptive processor which is called FDSP (Flexible DOF STAP Processor) is presented. The processor adjusts its system DOF (degree of freedom) adaptively with variable interference environment. Compared with fixed DOF STAP processor, FDSP reduces large computational complexity and improve the performance of clutter and jammer suppression. The implementation of FDSP is illustrated. The validity of FDSP is proved by measurement data processing result.

Key words: clutter rejection; jammer suppression; STAP; DOF

1 引言

STAP 是一个多普勒频率与空间频率的二维滤波问题,用于检测淹没在强地杂波和各种干扰中的目标^[1]. 雷达系统沿某一特定方向发射能量,并仅检测该方向回波中的目标. 由于目标速度是未知的,应对除主杂波占据的多普勒通道之外的所有多普勒通道进行检测. 因此,对于每一个相干处理间隔 (Coherent Processing Interval, CPI),所有的多普勒通道都需要检测,而检测的角度是固定的. 利用这一特点,局域 STAP 处理器应运而生. 这类处理器是将 CPI 数据经过二维离散傅氏变换,变换到角度—多普勒域,在主波束附近选取几个辅助波束,沿多普勒通道进行滑窗,构造若干个处理局域 (Localized Processing Region, LPR) 计算自适应权值,其特点是系统自由度低,计算量小,估计干扰协方差矩阵所需的样本数少,这对于非均匀杂波处理来说是非常有利的. 这类处理器包括 JDL^[2], STMB^[3] 等.

对于多普勒频率远离主杂波的目标,由于主杂波已被多普勒滤波有效抑制,这时目标检测受杂波的影响较弱. 对于慢速目标,特别是地面慢动目标其多普勒频率接近主杂波谱,由

于杂波已从主通道的主瓣渗入,杂波影响大大增强. 一般情况下,STAP 处理器在选择系统自由度时总是要求满足主杂波区的性能指标的. H Wang 等根据研究杂波的经验,认为杂波自由度一般为 10 左右^[2]. 因此, JDL 的 LPR 在非主杂波区是 3×3 的矩形,即在空域选取 2 个辅助波束,时域上选取 2 个辅助多普勒通道;而在主杂波区选取的 LPR 为 3×4 的矩形,即时域选 3 个辅助多普勒通道. 文献[3]指出 JDL 在阵元误差很小的情况,性能是优越的. 但在实际应用中由于阵元误差存在,致使杂波谱向空域方向扩散,仅选取 2 个空域辅助波束是不能满足杂波抑制要求的,这导致 JDL 性能严重下降. 因此文[3]的作者认为在构造 LPR 时,必须选用更多的空域波束,而且他认为辅助波束的两个辅助多普勒通道对算法性能改善作用不大,沿多普勒通道滑动的 LPR 应当是一个“十字架”.

提出这类处理器的学者都指出,应当根据所检测的多普勒通道是属于主杂波区和非主杂波区而选用两种系统自由度. 主杂波区的系统自由度应大于非主杂波区. 但是这两个区域往往是模糊不清的,如果系统自由度全按主杂波区选取,计算量过大. 另外,如果在检测区域存在有源干扰,干扰会消耗系统自由度,使杂波抑制性能下降. 对于在检测区域存在有源

干扰的情况,文献[4]指出对于局域处理的方法,增加系统自由度(空域辅助波束)可以有效消除有源干扰.这就为我们提出了一个实际的问题,如何自适应地改变系统自由度,以适应外部干扰环境变化.文献[5]考虑到了主杂波和非主杂波之间界线并非那么明显,针对3DT提出了结构自适应的处理器.但该处理器是一个很简单的模型,它假设系统自由度初始值从1开始,达到所需的系统自由度时所需的计算次数较多,处理器的收敛速度慢.

针对上述处理器的不足,本文提出了一种稳健的局域STAP处理器,我们称之为FDSP(Flexible DOF STAP Processor).该处理器根据杂波复杂度和外部干扰环境变化情况,自适应调整系统自由度,这样既降低了非主杂波区的杂波抑制的计算量,又可以有效抑制有源干扰.本文详细叙述了FDSP的实现方法和步骤,并利用实测数据证明该处理器的有效性.本文后续章节的安排如下,第二节简要分析了局域处理器;第三节给出了FDSP的实现方法和权值递推求解的快速算法;第四节用实测数据证明该处理器的有效性;第五节给出结论.下面我们展开论述.

2 局域 STAP 处理器

设 N 个通道,接收 M 个脉冲,则第 k 个距离单元的空时快拍数据为 $MN \times 1$ 维矢量,形如式(1)

$$\mathbf{X}_k = [\mathbf{x}_{k,1,1}, \mathbf{x}_{k,N,1}, \mathbf{x}_{k,1,2}, \dots, \mathbf{x}_{k,N,2}, \dots, \mathbf{x}_{k,1,M}, \dots, \mathbf{x}_{k,N,M}] \quad (1)$$

其中三个下标分别表示距离、通道和脉冲.每一个空时快拍由加性的杂波、有源干扰、热噪声和可能出现的目标组成.STAP的目标是使信号与杂波、干扰和噪声的比值(SINR)最大,则自适应系统的权值和滤波器输出为:

$$\mathbf{W} = \frac{\mathbf{R}^{-1}\mathbf{S}}{\mathbf{S}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}} \quad y = \mathbf{W}^H \mathbf{X}_k \quad (2)$$

其中 \mathbf{R} 是干扰(杂波、有源干扰和噪声的统称)协方差矩阵.但在实际中该矩阵是未知的,通常使用的是它的最大似然估计

$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \sum_i \hat{\mathbf{x}}_i \hat{\mathbf{x}}_i^H$. \mathbf{S} 为时空导向矢量,它可以描述为 $\mathbf{S} = \mathbf{S}_s \otimes \mathbf{S}_t$, 即式(2)、(3)表示的空域导向矢量和时域导向矢量的 Kronecker 积, f_s 和 f_t 分别为归一化空频和时频

$$\mathbf{S}_s = [1 \ e^{j2\pi f_s} \ e^{j2^* 2\pi f_s} \ \dots \ e^{j3^* 2\pi f_s} \ \dots \ e^{j(N-1)^* 2\pi f_s}]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{S}_t = [1 \ e^{j2\pi f_t} \ e^{j2^* 2\pi f_t} \ \dots \ e^{j3^* 2\pi f_t} \ \dots \ e^{j(N-1)^* 2\pi f_t}]^T \quad (4)$$

从导向矢量的表达式我们可以看出,空域和时域导向矢量实质上就是傅氏系数.因此与时空导向矢量的内积等效于二维离散傅氏变换(2-D DFT).2-D DFT 将空时数据 \mathbf{X} 变换为角度-多普勒数据 \mathbf{X}_T .由于 DFT 矩阵的列之间是正交的,所以 2-D DFT 将多通道、多脉冲目标数据变换为角度-多普勒域中的一点.这种信号与干扰的局域化表明使用有限数目的自适应权可以达到干扰抑制的效果.

$$\mathbf{X}_T = \mathbf{T}_L^H \mathbf{X}, \quad \mathbf{S}_T = \mathbf{T}_L^H \mathbf{S} \quad (5)$$

局域 STAP 处理器是将空时数据 \mathbf{X} 和导向矢量 \mathbf{S} , 通过和变换矩阵 \mathbf{T}_L 的内积运算构造求解自适应权的 LPR, 如式(5).

文献[3]中的变换矩阵形如式(6).

$$\mathbf{T}_L = \begin{bmatrix} [\mathbf{S}_S(\omega_{s_i}) \otimes \mathbf{S}_T(\omega_{t_j})]^T \\ [\mathbf{S}_S(\omega_s) \otimes \mathbf{S}_T(\omega_{t_1})]^T \\ [\mathbf{S}_S(\omega_s) \otimes \mathbf{S}_T(\omega_{t_2})]^T \\ \vdots \\ [\mathbf{S}_S(\omega_{s_i}) \otimes \mathbf{S}_T(\omega_{t_j})]^T \\ [\mathbf{S}_S(\omega_{s_1}) \otimes \mathbf{S}_T(\omega_{t_j})]^T \\ [\mathbf{S}_S(\omega_{s_2}) \otimes \mathbf{S}_T(\omega_{t_j})]^T \\ \vdots \\ [\mathbf{S}_S(\omega_{s_p}) \otimes \mathbf{S}_T(\omega_{t_j})]^T \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, p, j = 1, 2, \dots, q, \mathbf{T}_L$ 为 $(p + q + 1) \times 1$ 维, 则第 i 个波束和第 j 个多普勒通道的权值 $\mathbf{W}(i, j)$ 可以描述为

$$\mathbf{W}(i, j) = (\mathbf{T}_L^H \mathbf{R} \mathbf{T}_L)^{-1} \mathbf{T}_L^H \mathbf{R} \mathbf{S} \quad (7)$$

3 稳健的局域 STAP 处理器

对于机载相控阵雷达,杂波谱的分布与载机的运动参数以及天线面向等因素有关.杂波谱不仅位置(参数)会变化,同时其复杂度(结构)也会变化.在实际应用中,相控阵天线都要进行微波列合成,阵元误差使杂波谱分布更加复杂.考虑杂波复杂度变化的自适应应该是变结构(改变系统自由度)的.而现有固定系统自由度的局域 STAP 处理器, LPR 的系统自由度是按主杂波区的性能需要确定的,在非主杂波区会用过多的波束去对付杂波,这些多余的波束对杂波抑制贡献甚微,系统自由度的一部分被浪费了.由于在非均匀杂波环境下可用的训练数据有限,自适应系统自由度过多对自适应响应收敛不利,还会造成波束畸变.另外,如果在检测区域存在有源干扰,它会损耗 LPR 的自由度,使杂波抑制性能下降.自适应地选取系统自由度才是解决这一问题的理想途径.

我们可以考虑这样的处理器,它依据杂波复杂度和外部干扰环境情况设定系统自由度,假设其系统自由度初始值为 $z_0 = p_0 + q_0 + 1$, 即一个空时主波束, p_0 个空域辅助波束, q_0 个时域辅助“波束”.此时的变换矩阵 \mathbf{T}_0 的形如(8)式,式中第一列为空时主波束,第 2 到 $q_0 + 1$ 列为时域辅助波束,第 $q_0 + 2$ 列到 $p_0 + q_0 + 1$ 列为空域辅助波束.利用式(8)对 CPI 数据和导向矢量进行处理.再利用式(2)计算自适应权值,对某一多普勒通道进行检测.

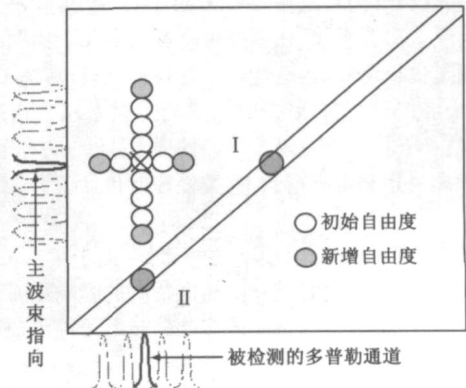


图1 FDSP的工作原理图

$$T_0 = \begin{bmatrix} [S_S(\omega_{i_0}) \odot S_T(\omega_{t_0})]^T \\ [S_S(\omega_{i_1}) \odot S_T(\omega_{t_1})]^T \\ [S_S(\omega_{i_2}) \odot S_T(\omega_{t_2})]^T \\ \vdots \\ [S_S(\omega_{i_0}) \odot S_T(\omega_{t_0})]^T \\ [S_S(\omega_{i_1}) \odot S_T(\omega_{t_1})]^T \\ [S_S(\omega_{i_2}) \odot S_T(\omega_{t_2})]^T \\ \vdots \\ [S_S(\omega_{p_0}) \odot S_T(\omega_{t_0})]^T \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

在系统自由度初始值的基础上, 增加系统自由度, 如图 (1) 空域先增加两个辅助波束, 此时的变换矩阵如式(9). 利用 (9) 式对 CPI 数据和导向矢量进行处理. 利用准则考察新增自由度对干扰(杂波和有源干扰)抑制的改善程度. 判断其对干扰抑制的贡献是否足够大, 如足够大(如 3dB), 再一次增加系统自由度, 时域先增加 2 个, 若性能有改善, 空域再增加 2 个. 如果改善因子(杂波输出功率)趋于稳定, 则进行下一个多普勒通道的检测.

$$T_L = \begin{bmatrix} T_0 \\ [S_S(\omega_{p_1}) \odot S_T(\omega_{t_1})]^T \\ [S_S(\omega_{p_2}) \odot S_T(\omega_{t_2})]^T \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

3.1 准则选取

STAP 研究领域一般使用信杂噪比(SINR)损失和改善因子作为干扰抑制的性能尺度^[6]. 其定义分别为式(10)和式(11)

$$SINR_{Loss} = \left(\frac{|W^H S|^2}{W^H R W} \right) \left| S^H R^{-1} S \right| \quad (10)$$

$$IF = SINR_{out} / SINR_{element} = |W^H S|^2 / (\sigma_c^2 + \sigma_n^2) / W^H R W \quad (11)$$

式(11)表明对于一个给定的空时单元, 改善因子就是输出 SINR 与输入 SINR 的比值, σ_c^2 是该单元在一个脉冲所接收的杂波功率, σ_n^2 为噪声功率. 式(10)和式(11)均可作为 FDSP 的性能尺度. 在这里, 我们选取改善因子.

3.2 系统自由度初始值选取

初始值应当基本满足非主杂区的杂波抑制要求的, 即它是一个性能与计算量折衷的值. 我们使用文献^[1]给出的杂波

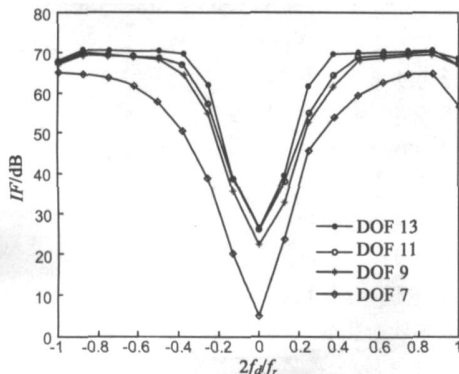


图2 阵元误差为 5% 的数据经不同系统自由度处理器处理后的改善因子

数据模型生成的仿真数据为例, 说明初始自由度的选取. 图 2 为阵元误差为 5% 的数据, 经过不同自由度处理后的改善因子图. 表 1 我们给出了不同阵元误差的数据, 经过不同系统自由度的处理器的处理, 得到的改善因子的平均值(单位为 dB). 由图 2 和表 1 我们可以得出系统自由度为 7(3+ 4, 时域 3 个多普勒通道, 空域 4 个辅助波束) 时与 9(空域增加 2 个自由度) 时的差别达到近 10dB. 而达到 9 和大于 9 后, 改善程度并不多, 即系统趋于稳定. 因此, 我们可以得出结论, 系统自由度达到 9 以后, 基本可以满足杂波抑制的要求. 因此, 我们不妨设定 FDSP 的自由度初始值为 9. 即一个空时主波束, 2 个时域辅助波束, 6 个空域辅助波束.

STAP 处理器估计干扰协方差矩阵, 所需满足独立同分布(IID)的样本个数应当达到 2~ 3 倍系统自由度^[1]. 由于 FDSP 要增加系统自由度, 因此要为该处理器提供足够的样本支持. 同时考虑到非均匀杂波问题, 可以在 FDSP 前级加一个数据预处理(非均匀检测器, NHD), 如文献[7]提出的 GIP_NHD(广义内积非均匀检测器). 一般情况下, 样本数为 5 倍的初始系统自由度数, 就完全可以满足 FDSP 的性能要求. 本文在数据试验时, 均使用 50 个距离单元估计协方差矩阵.

表 1 不同阵元误差的数据经不同系统自由度处理器处理后的平均改善因子

阵元误差	系统自由度			
	3(时域)+4(空域)	3+ 6	5+ 6	5+ 8
无误差	56.81	67.85	67.96	69.13
1%	56.74	67.43	67.78	68.74
3%	56.57	67.03	67.53	68.53
5%	56.49	66.13	67.32	68.31
7%	56.15	65.87	67.01	68.03

3.3 FDSP 权值递推快速算法

对于某一检测多普勒通道, FDSP 使用初始系统自由度时, 而它对杂波和干扰的抑制性能不能满足指标要求, 就需要增加处理器的自由度. 在这种情况下, 为了获得系统的自适应权值就需要新的求逆过程, 这对于计算量是没有明显改善的. 如果说, 有这样一种快速算法, 可以利用上一次的计算结果, 递推求出新的权值, 势必将大大降低系统的计算量. 这里我们给出 FDSP 权值求解的快速算法.

FDSP 使用初始系统自由度, 这时的权值求解, 需要一个 $z_0 \times z_0$ 维样本协方差矩阵的求逆过程. 如果性能不能满足要求, 系统首先增加一个自由度. 可以分析得出, 这时的样本协方差矩阵变为 $(z_0 + 1) \times (z_0 + 1)$, 如式(12)所示. 新增的行矢量 l 是新增自由度和原有自由度的互相关矢量, 而对角元素 r_{z_0+1, z_0+1} 为新增自由度的自相关, 新增列矢量 c 与 l 共轭对称.

$$R_{z_0+1} = \begin{bmatrix} R_{z_0} & c \\ l & r_{z_0+1, z_0+1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

由式(12)我们可以发现 R_{z_0+1} 实际上就是所谓的加边矩阵^[8]. 因此我们就可以应用加边矩阵的求逆定理.

z_0 阶方阵 $R_{z_0} = (r_{ij})_{i,j=1}^{z_0}$ 可逆, 则 $z_0 + 1$ 阶方阵 $R_{z_0+1} =$

$(r_{ij})_{i,j=1}^{z_0+1}$ 可逆的充要条件为

$$\omega_{z_0} = r_{z_0+1, z_0+1} - l_{z_0}^T R_{z_0}^{-1} c_{z_0} \neq 0 \quad (13)$$

且

$$R_{z_0+1}^{-1} = \begin{bmatrix} R_{z_0}^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & 0 \end{bmatrix} + \omega_{z_0}^{-1} \begin{bmatrix} -R_{z_0}^{-1}c \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -l_{z_0}^T R_{z_0}^{-1} & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中

$$c_{z_0} = (r_{1, z_0+1}, \dots, r_{z_0, z_0+1})^T \quad (15)$$

$$c_{z_0}^T = (r_{z_0+1, 1}, \dots, r_{z_0+1, z_0})^T \quad (15)$$

由于计算初始系统自由度的权值所需的求逆的结果 $R_{z_0}^{-1}$ 是已经计算得出的, 利用式(14)就可递推求出增加了一个自由度后所需的 $R_{z_0+1}^{-1}$, 进而求出新增自由度后的系统权值. 这样就将新增自由度的后系统权值求解的求逆过程转化为乘累加运算. 这对于专为乘累加运算而设计的数字信号处理器(DSP)而言, 其计算量的增加是很小的. 也就是说, 系统增加自由度后, 计算量的增加是相当小的. 利用这一计算特点, FDSP 在计算量上较固定系统自由度的处理器有很大的优势.

4 数据测试

我们使用 Mountaintop 计划中, 代号为 t38pre01v1.dat 的数据文件检验 FDSP 的处理效果. Mountaintop 计划利用一部 IDPCA 雷达模拟机载平台接收的雷达回波^[9,10]. 雷达脉冲是由 IDPCA 发射, 另一部接收雷达(RSTER)接收到的地杂波与机载平台观察到的地杂波是等效的. RSTER 雷达的视轴角为偏正北 26° . 脉冲重复频率为 62.5Hz . IDPCA 雷达用于模拟位于(相对于正北) 24° , 距离 154km , 多普勒频率为 156Hz 的杂波回波. RSTER 系统内部的测试目标产生器生成一个模拟目标信号, 该目标位于 154km 处, 275° , 多普勒频率为 156Hz . 数据记录距离单元 130km 到 195km , 距离分辨率为 150m . 每一个 CPI 中有 16 个 PRI, 14 个通道. 目标和干扰的归一化的多普勒频率均为 0.25 . 模拟目标位于与杂波散射体相同的距离段, 相同的多普勒频率, 但方位角不同. 数据中没有人工干扰源. Mountaintop 数据未经过脉压处理, 因此, 要为数据设计合适的匹配滤波器.

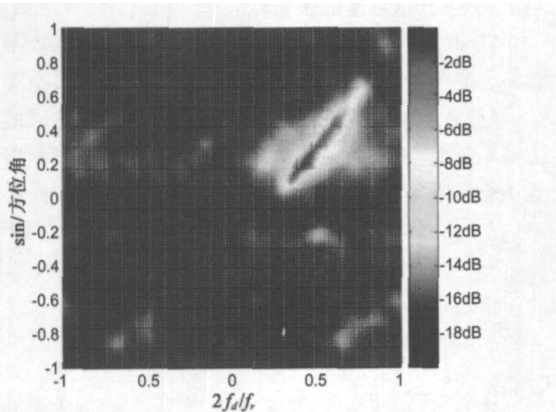


图3 Mountaintop数据(t38pre01v1.dat)的杂波功率谱

图3给出了数据的杂波功率谱图, 图中可清晰地看到杂波. 图中的杂波仅分布于部分多普勒频率和方位角, 而不像常

见的杂波谱图, 杂波脊是完整的一条对角线. 这是由于 Mountaintop 实验特殊的实验环境决定的^[10]. 图中亦可以看到目标.

相应地, 图4给出了 FDSP 的滤波器响应图, 在目标位置形成峰值, 在沿对角线, 杂波位置形成了深凹口.

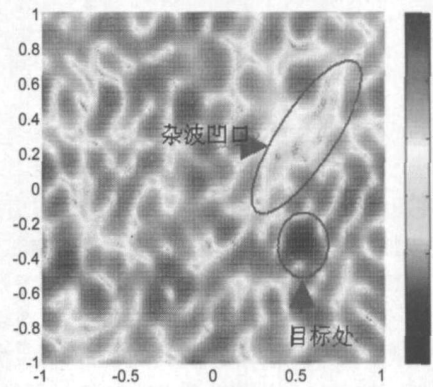


图4 FDSP的滤波器响应

图5给出了 FDSP 和 STMB(DOF 为 13, 5 个多普勒通道, 8 个辅助束) 滤波器输出. 由图5我们可以看到, 两个滤波器均检测出目标(位于 154km 公里处), 由于 STMB 采用了满足主杂波性能的系统自由度, 因此其杂波抑制性能稍好. 图6给出了 FDSP 检测不同多普勒通道所用的自由度. 检测每一个多普勒通道, STMB 均使用 13 个自由度, 因此每次均需要计算 13×13 维矩阵的逆, 仅求逆就需要 2197 次算术操作. 对于 Mountaintop 数据这样没有阵元误差的数据, FDSP 在非主杂波区杂波抑制所需的初始系统自由度甚至不需要达到 9 个, 本

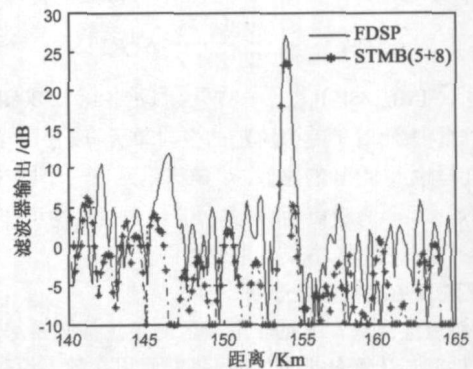


图5 FDSP和STMB(5+8)滤波器输出

试验将 FDSP 的初始系统自由度设为 9 是为了与前面的论述保持一致. 由图6可以看到, FDSP 的系统自由度仅在图1中的 I 区和 II 区杂波处系统自由度发生了变化. 因此, FDSP 在沿 Doppler 通道检测时, 在大多数多普勒通道处仅需要求解 9×9 矩阵的逆. 即便系统自由度发生了变化, 利用 3.3 的快速算法, 也可将计算量的增加量降到很小. 因此, FDSP 在计算量上较固定系统自由度处理器有很大优势.

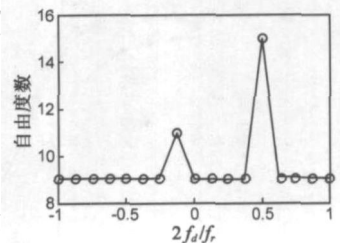


图6 FDSP在不同多普勒通道的自由度

5 结论

机载预警雷达回波, 主杂波区和非主杂波区杂波抑制所需的系统自由度不同, 而在实际应用中这两个区域往往是不清晰的. 对于 STAP 而言, 它所要对付的杂波仅分布于空时二维平面的小部分区域. 采用固定系统自由度的处理器, 其自由度是按照主杂波区的杂波抑制性能来设定的, 这样的处理器在非主杂波区造成了计算资源的浪费. 如果在检测区域存在有源干扰, 会消耗系统自由度, 导致处理器杂波抑制性能下降. 本文提出的稳健的局域 STAP 处理器考虑到杂波复杂度和干扰环境的变化, 在性能满足要求的前提下使用尽可能少的系统自由度进行处理. 详细论述了该处理器的实现方法和步骤. 并通过实测数据证明了该处理器的有效性. 该处理器适用于大阵面、多通道和多脉冲数的情况. 特别是在复杂的战场电磁环境下和非均匀杂波背景下, 该处理器将会有广阔的应用前景.

参考文献:

- [1] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 46- 55.
Wang Yongliang, Peng Yingning. Space Time Adaptive Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 46- 55 (in Chinese)
- [2] Hong Wang, Lujing Cai. On adaptive spatial temporal processing for airborne surveillance radar system[J]. IEEE Trans AES, 1994, 30(3): 660- 669.
- [3] Youngliang Wang, et al. Robust space time adaptive processing for airborne radar in non homogeneous clutter environments[J]. IEEE Trans AES, 2003, 39(1): 70- 81.
- [4] Youngliang Wang, et al. Space time joint processing method for simultaneous clutter and jamming rejection in airborne radar[J]. IEE Electronics Letters, 1996, 32(3): 258- 259.
- [5] 董瑞军, 等. 结构自适应 STAP[J]. 电子学报. 2001, 29(3): 397- 399.
Dong Ruijun, et al. Structure Adaptation for STAP[J]. ACTA Electronica Sinica, 2001, 29(3): 397- 399. (in Chinese)

- [6] Melvin W L. A STAP overview [J]. IEEE AES Magazine, 2004, 19(1): 19- 35.
- [7] Melvin W L, Wicks M C. Improving practical space time adaptive training[A]. Proceedings of the IEEE National Radar Conf [C]. New York: IEEE Press, 1997. 48- 53.
- [8] 许仲, 等. Toeplitz 矩阵类的快速算法[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999. 3- 5.
Xu Zhong, et al. The Fast Algorithms of Toeplitz Matrices[M]. Xi'an: Northwest industrial university press, 1999. 3- 5. (in Chinese)
- [9] Titi G W. An overview of the ARPA/ NAVY mountainTop program[A]. Proceedings of the IEEE Adaptive Antenna Systems Symposium[C]. New York: IEEE Press, 1994. 853- 856.
- [10] Titi G W. The ARPA/ NAVY mountaintop program: Adaptive signal processing for airborne early warning radar[A]. Conference Proceedings of 1996 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C]. Atlanta, Georgia: IEEE Press, 1996. 1165- 1168.

作者简介:



范西昆 男, 1976 年生于陕西西安, 国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生, 主要从事 STAP、实时信号处理等方面的研究.

E-mail: vanxikun@sina.com



王永良 男, 教授、博士生导师, 1965 年生于浙江嘉兴, 1994 年获西安电子科技大学博士学位, 1996 年 12 月清华大学博士后出站, 现为空军雷达学院科研部部长, 中国电子学会无线电分会委员, 已发表论文 150 多篇, 收入三大检索 70 余篇, 出版学术专著 2 部, 曾获高校青年教师奖和中国优秀博士后奖, 入选新世纪百千万人才工程

国家级人选, 主要研究领域为: 侦察、监视与预警技术、空时二维处理、阵列信号处理等.