

基于三维交叉波束的降维双基杂波抑制技术

程宇峰¹, 李勇¹, 陈峰峰², 邓晓波², 程伟¹

(1.西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072;
2.中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所, 江苏 无锡 214063)

摘 要:针对机载双基雷达杂波非平稳性导致传统杂波抑制算法性能下降的问题,对机载双基杂波进行建模,在此基础上,分析了 4 种典型作战场景下的双基杂波特性。为降低 STAP 算法的计算量,提出一种三维交叉波束杂波抑制算法。该算法采用变换矩阵将空时二维数据转换为方位-俯仰-多普勒三维数据,剔除辅助波束杂波数据,只保留对双基杂波抑制起主要作用的主波束杂波数据,形成三维交叉波束进行局部自适应杂波抑制,在大幅降低算法计算量与训练样本需求量的同时尽量保证杂波抑制性能不下降。通过分析多种算法在典型作战场景下的杂波抑制效果与计算量,验证了所提算法有效性。所提算法在机载双基以及非平稳杂波抑制方面的应用潜力巨大。

关 键 词:双基杂波;杂波抑制;三维交叉波束;降维算法

中图分类号: TN959.73

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2023)02-0379-10

面对复杂电磁环境,特别是隐身目标、综合电子干扰、高速高机动目标等威胁,如果仅仅关注单平台能力建设和个体作战能力发展,将会在未来的体系化作战中处于劣势。双基协同探测具有探测信息丰富、资源配置灵活、作战样式多样等特点,将会是未来主要作战模式。

机载双基雷达是指将发射机和接收机分置于相隔一定距离的 2 个独立载机平台上的雷达系统。机载双基雷达收发分置的特点使其具备优异的抗干扰、抗电子侦察、抗摧毁和反隐身性能^[1-2]。与此同时,机载雷达面临着严重的地面杂波干扰,而机载双基雷达的收发分置、杂波谱分布与雷达系统参数以及机载双基场景的几何配置紧密相关,导致杂波谱分布更为复杂,传统的单机空时自适应处理技术(STAP)技术无法有效抑制双基杂波,进而导致目标检测性能大幅降低^[3]。

杂波非均匀性是双基机载雷达杂波抑制面临的一大难题,直接制约着传统 STAP 方法的杂波抑制性能。为恢复双基 STAP 训练数据集的均匀性条件,双基 STAP 技术的研究主要集中在 2 个方面:

①对双基杂波的距离非平稳特性进行补偿或校正,比如多普勒弯曲法^[4]、导数更新法^[5]、自适应角度-多普勒补偿法^[6];②采用降维 STAP 技术,如空域降维法^[7]、多普勒域降维法^[8]、空时联合降维算法^[9]。由于杂波补偿算法需要对每一个距离门进行补偿,且仅适用于杂波不模糊的状态,应用场景比较受限。而降维算法较少涉及多级降维算法,计算量仍然较大。

为了在算法计算量与杂波抑制性能之间取得平衡,本文将文献[8]的方位域与俯仰域交叉思想和文献[9]的空时多波束思想拓展到三维(方位-俯仰-多普勒)波束域。采用空时导向矢量作为变换矩阵将空时二维数据转换为方位-俯仰-多普勒三维数据,在此基础上,剔除辅助波束数据,仅保留对权值影响较大的主波束数据,形成方位-俯仰-多普勒三维交叉型波束进行局部自适应杂波抑制,在兼顾杂波抑制性能的同时有效降低三维 STAP 空时自由度与训练样本需求量。

收稿日期:2022-06-26

基金项目:中央高校基本科研业务费(3102019ZX015)资助

作者简介:程宇峰(1973—),西北工业大学博士研究生,主要从事协同探测雷达信号处理、智能化雷达研究。

通信作者:李勇(1962—),西北工业大学教授,主要从事雷达信号处理研究。e-mail: pupil_119@nwpu.edu.cn

1 双基杂波建模与特性分析

1.1 双基杂波建模

机载双基雷达的接收机和发射机分散布置,杂波散射点与接收机和发射机的几何关系模型如图1所示。 T 和 R 分别表示发射机和接收机的位置,它们距离地面的高度分别为 H_t 和 H_r , d 表示发射机到接收机的基线距离, T' 和 R' 分别表示发射机和接收机在地面的投影。 v_t 和 v_r 分别表示发射机和接收机的飞行速度, β_t 和 β_r 分别表示杂波散射点 P 与发射机和接收机飞行方向的夹角; α_t 和 α_r 分别表示发射阵列和接收阵列的安装角; R_t 和 R_r 分别表示杂波散射点到发射机和接收机的距离; ϕ_t 和 ϕ_r 分别表示杂波散射点 P 相对于发射机和接收机的俯仰角; θ_t 和 θ_r 分别表示杂波散射点 P 相对于发射阵列和接收阵列轴线的方位角。杂波散射点相对于接收阵列的空间余弦为 $\cos\psi_r = \cos\theta_r \cos\phi_r$ 而地杂波的多普勒频率为

$f_d = \frac{v_t}{\lambda} \cos\beta_t + \frac{v_r}{\lambda} \cos\beta_r$,其中, λ 为雷达波长。

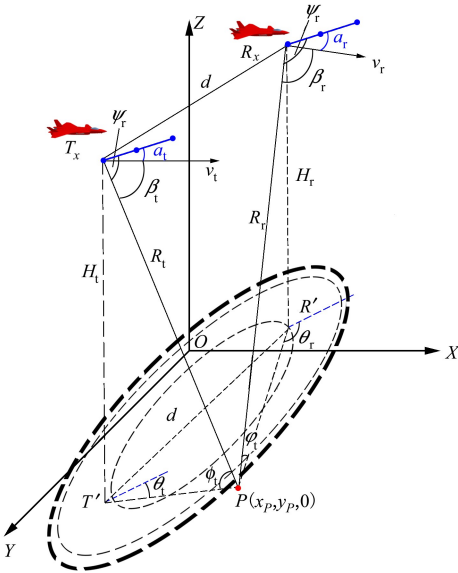


图1 机载双基雷达几何关系

杂波散射点到接收机与发射机距离和相等的点构成的椭球面方程为

$$\begin{aligned} & [4(x_R - x_T)^2 - 4R_1^2]x^2 + \\ & [4(y_R - y_T)^2 - 4R_1^2]y^2 + \\ & 8(x_R - x_T)(y_R - y_T)xy + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [4A(x_R - x_T) + 8R_1^2 x_R]x + \\ & [4A(y_R - y_T) + 8R_1^2 y_R]y + \\ & [A^2 - 4R_1^2(x_R^2 + y_R^2 + z_R^2)] = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: (x_T, y_T, z_T) 和 (x_R, y_R, z_R) 分别为发射机和接收机的坐标; R_1 为杂波散射点到发射机与接收机的距离和; $A = x_T^2 + y_T^2 + z_T^2 - x_R^2 - y_R^2 - z_R^2 - R_1^2$ 。设机载双基雷达地面等距离和非标准椭圆方程为 $ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + 1 = 0$,与(1)式联立得到各系数表达式为

$$\begin{cases} a = \frac{4(x_R - x_T)^2 - 4R_1^2}{A^2 - 4R_1^2(x_R^2 + y_R^2 + z_R^2)} \\ b = \frac{8(x_R - x_T)(y_R - y_T)}{A^2 - 4R_1^2(x_R^2 + y_R^2 + z_R^2)} \\ c = \frac{4(y_R - y_T)^2 - 4R_1^2}{A^2 - 4R_1^2(x_R^2 + y_R^2 + z_R^2)} \\ d = \frac{4A(x_R - x_T) + 8R_1^2 x_R}{A^2 - 4R_1^2(x_R^2 + y_R^2 + z_R^2)} \\ e = \frac{4A(y_R - y_T) + 8R_1^2 y_R}{A^2 - 4R_1^2(x_R^2 + y_R^2 + z_R^2)} \end{cases} \quad (2)$$

得到非标准椭圆的长轴倾角和几何中心分别为

$$\theta = 0.5 \arctan\left(\frac{b}{a-c}\right), x_c = \frac{be - 2cd}{4ac - b^2}, y_c = \frac{bd - 2ae}{4ac - b^2}。$$

长半轴和短半轴分别为

$$\begin{cases} L_a = \sqrt{\frac{2(ax_c^2 + bx_c y_c + cy_c^2 - 1)}{a + c + \sqrt{(a-c)^2 + b^2}}} \\ L_b = \sqrt{\frac{2(ax_c^2 + bx_c y_c + cy_c^2 - 1)}{a + c - \sqrt{(a-c)^2 + b^2}}} \end{cases} \quad (3)$$

计算双基雷达波束角度

$$\begin{cases} \theta_r = \arccos\left(\frac{\mathbf{L}_{R'P} \cdot \mathbf{e}_{ar}}{\|\mathbf{L}_{R'P}\| \|\mathbf{e}_{ar}\|}\right) \\ \phi_r = \arctan\left(\frac{H_r}{\|\mathbf{L}_{R'P}\| \|\mathbf{e}_{ar}\|}\right) \\ \theta_t = \arccos\left(\frac{\mathbf{L}_{TP} \cdot \mathbf{e}_{at}}{\|\mathbf{L}_{TP}\| \|\mathbf{e}_{at}\|}\right) \\ \phi_t = \arctan\left(\frac{H_t}{\|\mathbf{L}_{TP}\| \|\mathbf{e}_{at}\|}\right) \\ \beta_r = \arccos\left(\frac{\mathbf{L}_{RP} \cdot \mathbf{v}_r}{\|\mathbf{L}_{RP}\| \|\mathbf{v}_r\|}\right) \\ \beta_t = \arccos\left(\frac{\mathbf{L}_{TP} \cdot \mathbf{v}_t}{\|\mathbf{L}_{TP}\| \|\mathbf{v}_t\|}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中,向量 $\mathbf{L}_{R'P}, \mathbf{L}_{TP}, \mathbf{L}_{RP}, \mathbf{L}_{TP}$ 的坐标分别为

$$\begin{cases} \mathbf{L}_{R'P} = (x_P - x_R, y_P - y_R, 0) \\ \mathbf{L}_{TP} = (x_P - x_T, y_P - y_T, 0) \\ \mathbf{L}_{RP} = (x_P - x_R, y_P - y_R, -z_R) \\ \mathbf{L}_{TP} = (x_P - x_T, y_P - y_T, -z_T) \end{cases} \quad (5)$$

根据机载双基雷达方程,杂波回波信号的功率为

$$P_c = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 R_l^2 R_r^2 L_l L_r} \sigma^0 A_c \quad (6)$$

式中: R_l 和 R_r 分别为杂波散射点到发射机和接收机的距离; G_t 和 G_r 分别为发射天线和接收天线在杂波

散射点方向的增益; P_t 为发射机发射功率; L_l 和 L_r 分别为发射机和接收机损耗; σ^0 为杂波散射系数; A_c 为杂波散射单元面积。

1.2 双基杂波特性分析

图 2~5 为正侧阵与前视阵雷达杂波在典型作战场景下的三维(方位-俯仰-多普勒)分布。其中, $f_u = 0.5\sin\phi_r, f_v = 0.5\cos\theta_r\cos\phi_r$ 分别为该散射点对应的归一化俯仰向空间频率、归一化方位向空间频率。图 2 ~ 5 表明双基杂波特性与作战场景以及雷达摆放形式紧耦合,具有严重的非平稳性,大大降低双基雷达的目标检测能力。

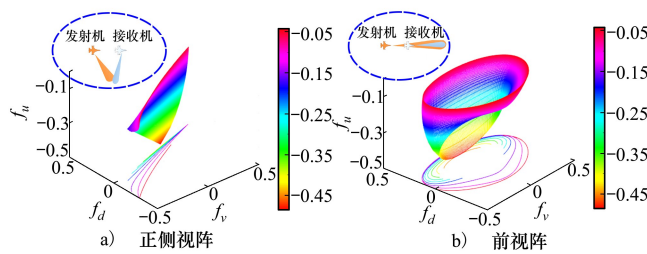


图 2 共线构型下杂波的三维分布

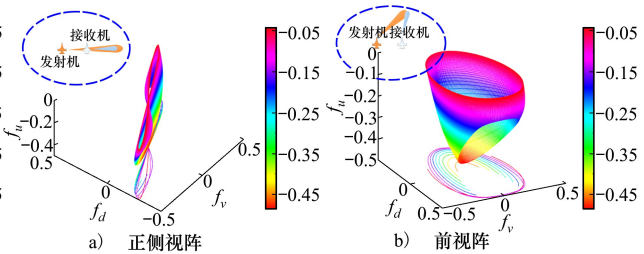


图 3 平行构型下杂波的三维分布

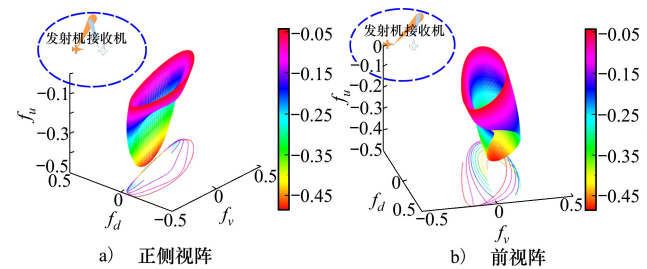


图 4 垂直构型下杂波的三维分布

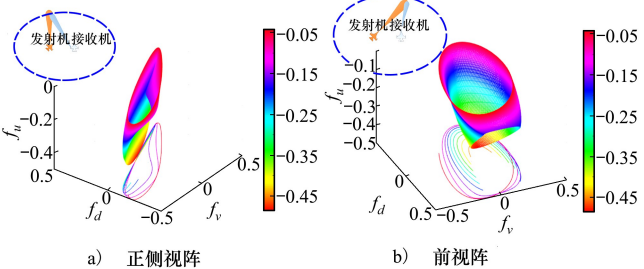


图 5 45°交叉构型下杂波的三维分布

STAP 处理流程如图 6 所示,其中杂波协方差估计要求训练样本中不包含目标信息且其杂波特性与待测样本一致,而双基杂波存在严重的距离非平稳性,导致待测距离单元的杂波协方差估计矩阵估计不精准,杂波功率谱扩散,降低雷达对慢动目标的检测能力,如图 7 所示。

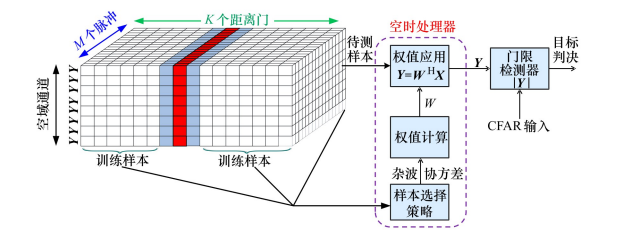


图 6 杂波处理流程图

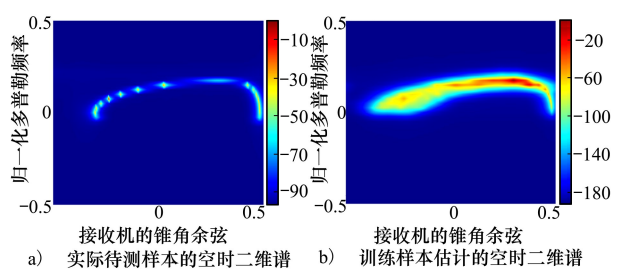


图 7 杂波空时谱

2 三维交叉双基杂波抑制技术

对于大型相控阵雷达,子阵划分技术可以在保证阵列雷达系统性能的同时有效降低系统复杂度与工程代价。Nickel 通过参考和差波束加权同时兼顾

阵列雷达信号处理流程提出一种简单有效的子阵划分算法,其主要包含“量化运算”和“相交运算”2个关键步骤^[10-11],划分方案如图 8 所示。

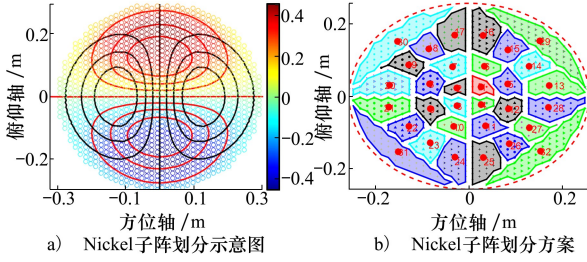


图 8 Nickel 子阵划分

子阵转换矩阵可表示为

$$\mathbf{T}_w = \text{diag}(\mathbf{s}_{ele}) \mathbf{T}_0 \quad (7)$$

式中, $\mathbf{T}_0$ 为 $M \times N$ 的子阵形成矩阵,在其第 n 列的所有元素中,只有与第 n 个子阵的阵元序号相对应的元素值为 1,其余均为 0,而阵元导向矢量 $\mathbf{s}_{ele}$ 为

$$\mathbf{s}_{ele} = g_m \mathbf{e}^{\left\{ j 2\pi \frac{[x_m \alpha(\theta_r, \phi_r) + y_m \beta(\theta_r, \phi_r)]}{\lambda} \right\}}, \quad m = 1, \dots, M \quad (8)$$

式中: (x_m, y_m) 为第 m 个阵元的坐标; g_m 为第 m 个阵元的幅度加权; M, N 分别表示阵元数与子阵数, $\alpha(\theta_r, \phi_r) = \cos\theta_r \cos\phi_r$, $\beta(\theta_r, \phi_r) = \sin\phi_r$ 。

为了获得最优的双基非平稳杂波抑制效果,引入俯仰波束域自由度构建三维波束域杂波抑制算法^[12-13]。基于波束域 STAP 算法的关键在于变换矩阵构造,在空域方面,利用方位波束转换矩阵 $\mathbf{T}_a \in \mathbf{C}^{N \times P}$ 和俯仰波束转换矩阵 $\mathbf{T}_e \in \mathbf{C}^{N \times Q}$ 将 N 维子阵数据转换为 P 维方位波束域与 Q 维俯仰波束域,则 $\mathbf{T}_a$ 的第 p 列与 $\mathbf{T}_e$ 的第 q 列分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{ap} &= \left[e^{j \frac{2\pi}{\lambda} [\xi_x(\alpha(\theta_p, \phi_p) - \alpha(\theta_r, \phi_r)) + \xi_y(\beta(\theta_p, \phi_p) - \beta(\theta_r, \phi_r))]} \right]^T \\ \mathbf{T}_{eq} &= \left[e^{j \frac{2\pi}{\lambda} [\xi_x(\alpha(\theta_r, \phi_q) - \alpha(\theta_r, \phi_r)) + \xi_y(\beta(\theta_r, \phi_q) - \beta(\theta_r, \phi_r))]} \right]^T \end{aligned} \quad (9)$$

式中, ξ_x 和 ξ_y 为子阵的方位与俯仰相位中心坐标,空域转换矩阵 $\mathbf{T}_s = \mathbf{T}_a \otimes \mathbf{T}_e$ 的维数为 $N \times PQ$,其中 $\otimes$ 表示 Kronecker 积, $\mathbf{T}_s$ 的第 i 列为

$$\mathbf{T}_{si} = \left[e^{j \frac{2\pi}{\lambda} [\xi_x(\alpha(\theta_{si}, \phi_{si}) - \alpha(\theta_r, \phi_r)) + \xi_y(\beta(\theta_{si}, \phi_{si}) - \beta(\theta_r, \phi_r))]} \right]^T \quad (10)$$

另外,在时域方面, $\mathbf{T}_l \in \mathbf{C}^{K \times L}$ 为时域转换矩阵,则 $\mathbf{T}_l$ 的第 l 列为

$$\mathbf{T}_{il} = \left[e^{j 2\pi f_d / f_r (k-1)} \right]^T, \quad k = 1, \dots, K \quad (11)$$

式中, f_r 表示脉冲重复频率,因此,降维矩阵由空域(方位域,俯仰域)、时域降维矩阵作直积表示为一

个 $NK \times PQL$ 的矩阵,联合局域化 STAP(JDL-STAP)算法对应的降维变换矩阵 $\mathbf{T}_{JDL}$ 为

$$\mathbf{T}_{JDL} = \mathbf{T}_a \otimes \mathbf{T}_e \otimes \mathbf{T}_l \quad (12)$$

文献[8]的交叉波束 STAP(CS-STAP)算法将数据由 NK 降维为 $(P + Q - 1) \times L$,波束域降维转换矩阵 $\mathbf{T}_{CS}$ 为

$$\mathbf{T}_{CS} = \mathbf{T}_{cs} \otimes \mathbf{T}_l$$

$$\mathbf{T}_{cs} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{a0} \otimes \mathbf{T}_e \\ \vdots \\ \mathbf{T}_{a0} \otimes \mathbf{T}_{e0} \\ \vdots \\ \mathbf{T}_a \otimes \mathbf{T}_{e0} \end{bmatrix} \quad (13)$$

文献[9]的空时多波束 STAP(STMB-STAP)算法将数据由 NK 降维为 $(P \times Q) + L - 1$,波束域降维转换矩阵 $\mathbf{T}_{STMB}$ 为

$$\mathbf{T}_{STMB} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_s \otimes \mathbf{T}_{t1} \\ \vdots \\ \mathbf{T}_s \otimes \mathbf{T}_{t0} \\ \vdots \\ \mathbf{T}_s \otimes \mathbf{T}_{tL} \end{bmatrix} \quad (14)$$

CS-STAP 算法与 STMB-STAP 算法虽然可以有效降低算法计算量与样本需求量,但仅仅在方位-俯仰或者方位-时域等二维进行降维操作,未能最大限度地发挥三维波束域算法的优势。因此,本文将其拓展到方位-俯仰-时域三维,提出方位-俯仰-时域多波束 STAP(AETMB-STAP)算法,该算法可将数据由 NK 降维为 $(P + Q - 1) + L - 1$,波束域降维转换矩阵 $\mathbf{T}_{AETMB}$ 为

$$\mathbf{T}_{AETMB} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{cs} \otimes \mathbf{T}_{t1} \\ \vdots \\ \mathbf{T}_{cs} \otimes \mathbf{T}_{t0} \\ \vdots \\ \mathbf{T}_{cs} \otimes \mathbf{T}_{tL} \end{bmatrix} \quad (15)$$

降维转换后的数据 $\bar{\mathbf{X}}_x = \mathbf{T}_x^H (\mathbf{T}_w^H \mathbf{X})$,导向矢量 $\bar{\mathbf{s}}_x = \mathbf{T}_x^H (\mathbf{T}_w^H \mathbf{s}_{ele})$, $\bar{\mathbf{s}}_x, \mathbf{T}_x, \bar{\mathbf{R}}_x, \bar{\mathbf{X}}_x$ 的下标 x 表示本文任一 STAP 算法的英文缩写, $\mathbf{X}$ 为 $NK \times 1$ 维空时采样回波数据,计算协方差矩阵 $\bar{\mathbf{R}}_x$,并得到自适应权值 $\bar{\mathbf{w}}_x$

$$\bar{\mathbf{R}}_x = \frac{1}{I} \sum_{i \in \Omega} \bar{\mathbf{X}}_x(i) \bar{\mathbf{X}}_x^H(i) \quad (16)$$

$$\bar{\mathbf{w}}_x = \frac{\bar{\mathbf{R}}_x^{-1} \bar{\mathbf{s}}_x}{\bar{\mathbf{s}}_x^H \bar{\mathbf{R}}_x^{-1} \bar{\mathbf{s}}_x} \quad (17)$$

式中, Ω 表示距离维训练样本集合。

由于本文缩略词较多,将其整理成表格便于对照,如表 1 所示。

表 1 缩略词对照表	
英文	中文
STAP	空时自适应处理
JDL-STAP	联合局域化 STAP
CS-STAP	交叉波束 STAP
STMB-STAP	空时多波束 STAP
AETMB-STAP	方位-俯仰-时域多波束 STAP
Nickel-3DT-STAP	Nickel-3 多普勒通道 STAP
(P,Q,L)X-STAP	(方位-俯仰-多普勒)X-STAP

图 9 表示多种 STAP 算法结构图。多通道雷达通过模拟波束形成网络形成空域(子阵)数据,在此基础上,为兼顾双基杂波抑制性能和计算量与训练样本需求量,AETMB-STAP 算法创新地提出:

- 1) 借助波束转换矩阵,将相互耦合的子阵数据解耦为相互独立的方位-俯仰域数据;
- 2) 借鉴 CS-STAP 算法的空域交叉思想与 STMB-STAP 算法的空时多波束思想,剔除主波束(方位-俯仰-多普勒)的数据,仅保留对双基杂波抑制起主要作用的三维交叉型主波束数据。

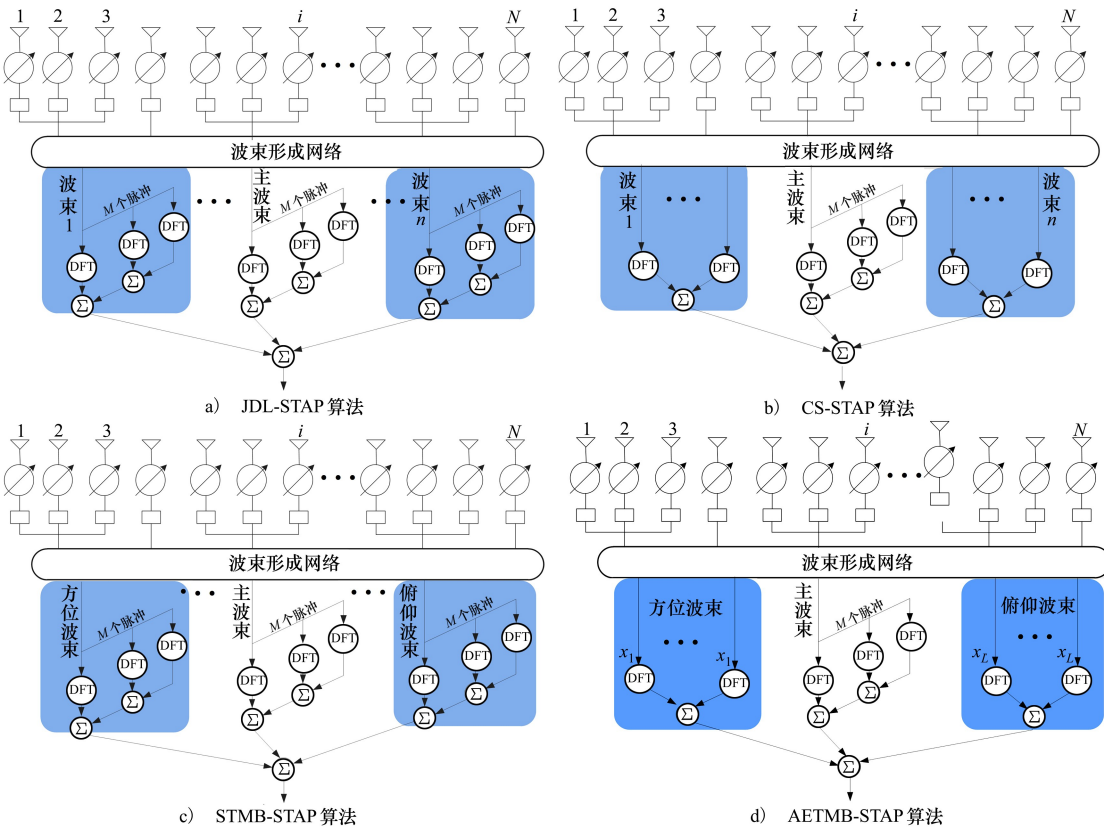


图 9 波束域 STAP 算法结构图

图 10 表示不同算法参与运算的数据单元对比,STAP 算法主要包含杂波协方差矩阵求逆的过程,所以其计算量为空时自由度的 3 次方。另外,为控制输出信杂噪比(SCNR)损失在 3 dB 以内,训练样本数据量应不小于 2 倍空时自由度。借助降维算法,Nickel-3DT-STAP 算法、JDL-STAP 算法、CS-STAP 算法、STMB-STAP 算法、CS-STAP 算法、AETMB-STAP 算法的自由度由 $N \times K$ 分别降到 $3 \times N$ 、 $P \times Q \times L$ 、 $(P + Q - 1) \times L$ 、 $P \times Q + L - 1$ 、 $(P + Q - 1) + L - 1$ 。因此,AETMB-STAP 算法拥有最低

的计算量与训练样本需求量,且随着 N, K 增大,降低效果将更加明显。

综上所述,AETMB-STAP 算法通过剔除辅助波束数据,仅保留主波束数据,使得算法计算量和样本需求量大为降低。同时由于辅助波束数据相比主波束数据对机载双基杂波抑制性能的影响较弱,所以对双基杂波抑制性能影响较小。另外,考虑到杂波特性具有局部(短距离)平稳性,所以 AETMB-STAP 算法对杂波抑制自由度的选择具有鲁棒性,因此 AETMB-STAP 算法非常适合应用于机载双基杂波

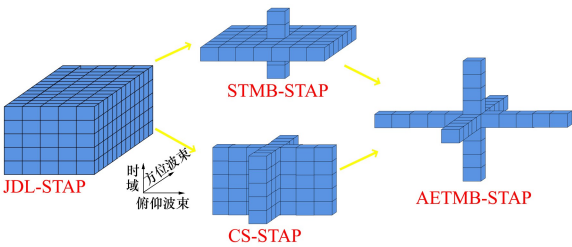


图 10 不同算法参与运算的数据单元对比图

抑制以及非平稳杂波抑制方面。

3 仿真实验

为了验证本文所提算法对双基杂波的抑制效果,本节首先根据机载双基雷达参数仿真逼真度子阵级双基杂波,子阵划分方案如图 8b) 所示,发射机与接收机均以 250 m/s 的速度飞行,发射机位于

(0,0,7) km,波束方位角和俯仰角分别为 -2.8° 和 29.7° 。接收机位于 $(-20,0,7)$ km,波束方位角和俯仰角分别为 -3.1° 和 15.9° ,目标位于接收机频谱中的 334 号距离门和 24 号多普勒门。在此基础上,分别对 JDL-STAP 算法、CS-STAP 算法、STMB-STAP 算法、CS-STAP 算法、AETMB-STAP 算法以及 Nickel-3DT-STAP 算法进行杂波抑制性能分析。采用 Taylor (-35 dB) 权值降低方向图副瓣,三维极坐标接收低副瓣方向图如图 11 所示。

图 12 为距离多普勒谱,图 12a) 表示脉冲多普勒输出频谱,可以发现,双基杂波强度大且杂波谱展宽,导致目标淹没在杂波中,无法检测。图 12b) 表示 Nickel-3DT-STAP 算法输出频谱,可以看出, Nickel-3DT-STAP 算法可有效抑制双基杂波,大幅提升目标检测能力。

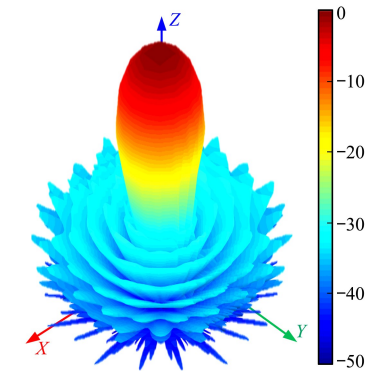


图 11 接收低副瓣三维极坐标方向图

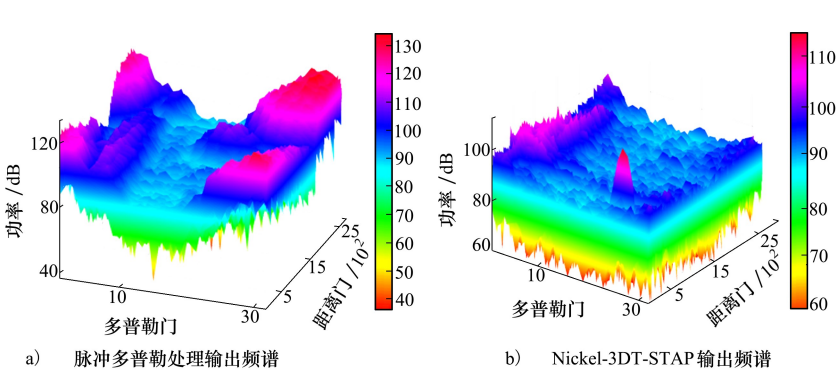


图 12 距离多普勒谱

图 13~16 分别表示经过 (3,3,3) JDL-STAP 算法、(5,5,3) STMB-STAP 算法、(5,5,3) CS-STAP 算法以及 (11,11,7) AETMB-STAP 算法处理后的输出频谱和归一化权值幅度三维分布图。经过上述 4 种

算法处理后,双基杂波均得到有效抑制。另外,权值归一化幅度分布图表明与主波束(方位-俯仰-多普勒)权值对应的幅度远远大于其他波束权值的幅度,表明主波束对双基杂波抑制起主要作用。

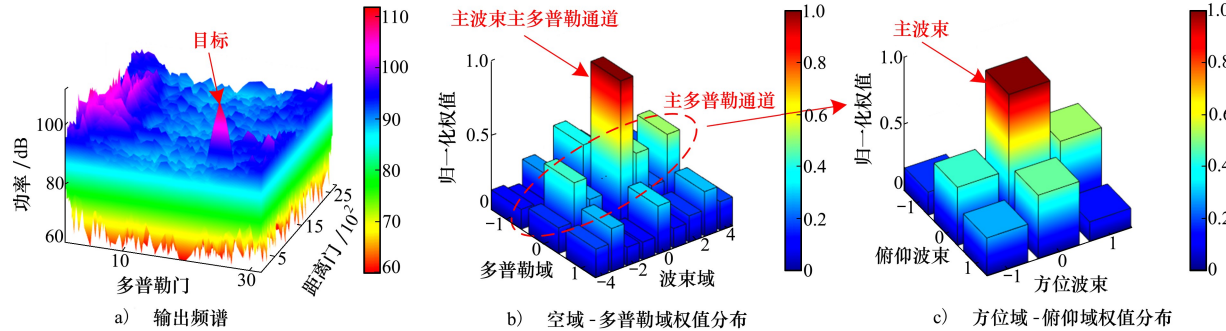


图 13 JDL-STAP 算法

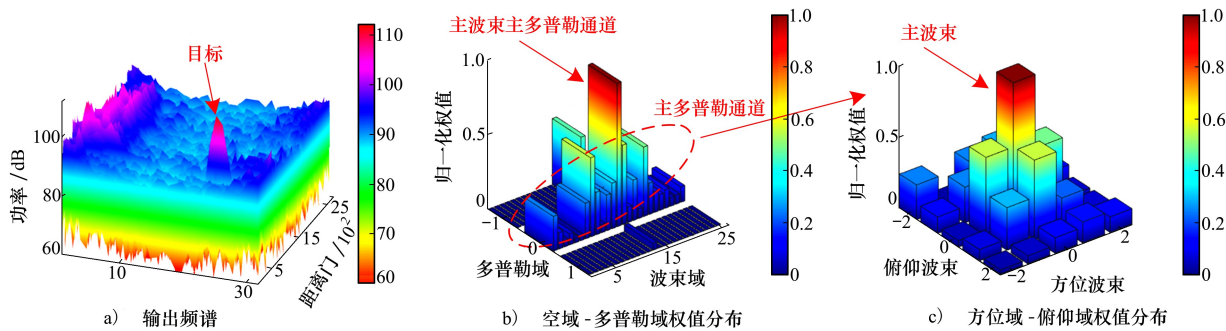


图 14 STMB-STAP 算法

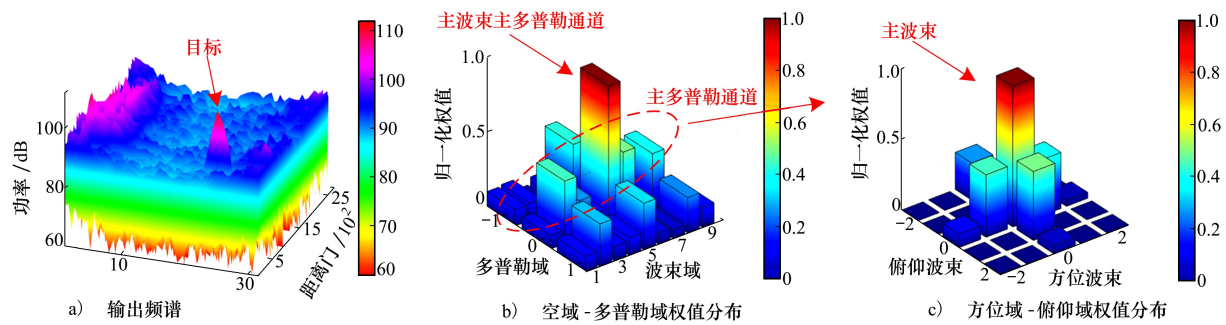


图 15 CS-STAP 算法

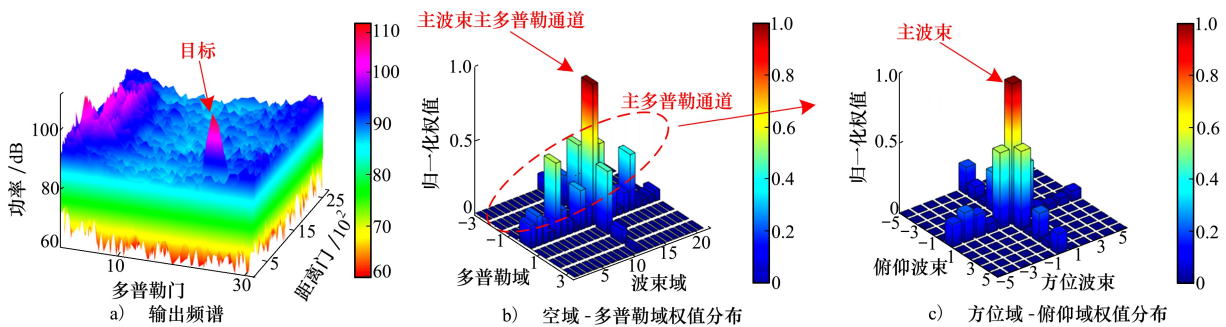


图 16 AETMB-STAP 算法

为更清晰对比不同算法的杂波抑制性能,图 17 给出了目标距离门与多普勒门的频谱切片对比,表

2 总结了上述双基杂波抑制算法的 SCNR、计算量以及训练样本需求量。

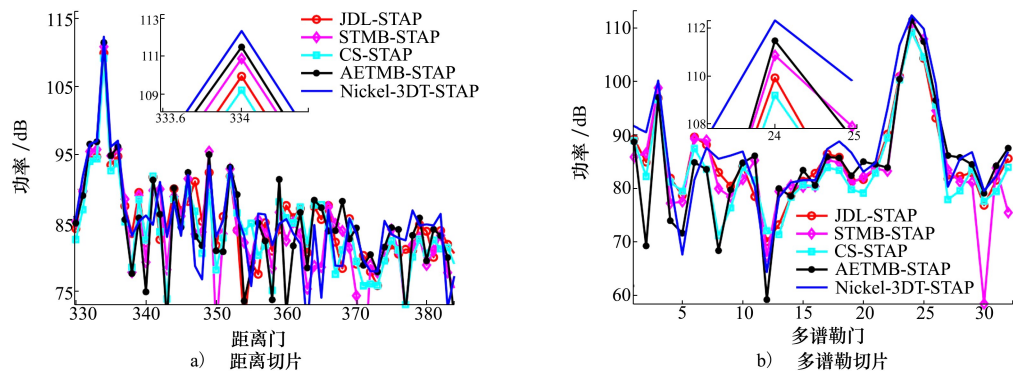


图 17 多种波束域 STAP 算法的频谱切片对比图

综合图 17 和表 2 结果,Nickel-3DT-STAP 算法具有最优的双基杂波抑制性能,但其计算量却远远大于其他算法;在相同计算量的前提下,AETMB-STAP 算法与 STMB-STAP 算法获得较好的杂波抑制性能,JDL-STAP 算法和 CS-STAP 算法的 SCNR 有所降低。

表 2 双基杂波抑制算法			
算法	SCNR	计算量	训练样本需求量
JDL-STAP	24.9	$O(27^3)$	54
STMB-STAP	25.9	$O(27^3)$	54
CS-STAP	24.3	$O(27^3)$	54
AETMB-STAP	26.5	$O(27^3)$	54
Nickel-3DT-STAP	27	$O(96^3)$	192

实际工程中误差不可避免,由于技术的进步,多普勒通道误差可忽略不计,所以本次仿真实验只考虑空域通道相位误差。为了综合分析不同波束域算

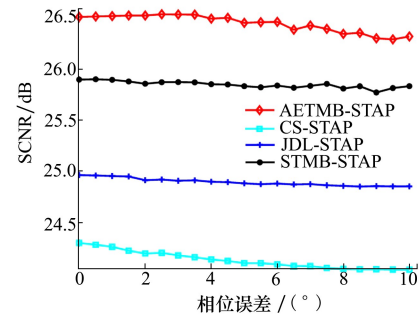


图 18 多种波束域 STAP 算法的 SCNR 与相位误差的曲线

为了进一步综合评估 AETMB-STAP 的杂波抑制性能,分析 AETMB-STAP 算法对不同自由度的敏感性,图 19 与表 3 给出了不同自由度 AETMB-STAP 算法的 SCNR、计算量以及训练样本需求量,可以发现 AETMB-STAP 算法杂波抑制性能并没有随着空时自由度的降低而下降,而是在(7,7,5)自由度处获得最优的杂波抑制性能,这是因为随着空时自由度的降低,有效减少训练样本需求量,使得估计的协方差矩阵有可能更接近待测样本杂波实际协方差矩阵,所以输出 SCNR 达到最大值。另外,还可以发现,AETMB-STAP 算法对波束域个数选择不敏感,非常适合工程应用。

法对误差的鲁棒性,图 18 给出了不同算法的 SCNR 与相位误差的变化曲线,为了更加贴合误差的随机性同时消除误差的偶然性,本文采用 500 次蒙特卡洛实验的均值作为 SCNR 结果。图 18 表明在相同计算量的前提下,AETMB-STAP 算法可以获得最佳的杂波抑制性能,STMB-STAP 算法次之,CS-STAP 算法和 JDL-STAP 算法的杂波抑制能力相对较弱。另外,随着相位误差的增大,AETMB-STAP 算法与 CS-STAP 算法的杂波抑制能力下降较为明显,而 STMB-STAP 算法与 JDL-STAP 算法则变化相对较小,这是因为机载双基雷达杂波多普勒扩展主要是因为杂波强度大且不同角度的杂波多普勒频率不同,杂波的空变特性要强于时变特性,所以空域自由度决定双基杂波抑制性能。而 AETMB-STAP 算法与 CS-STAP 算法在波束域进行降维处理,导致波束域算法对误差的鲁棒性降低,输出 SCNR 有一定的损失。

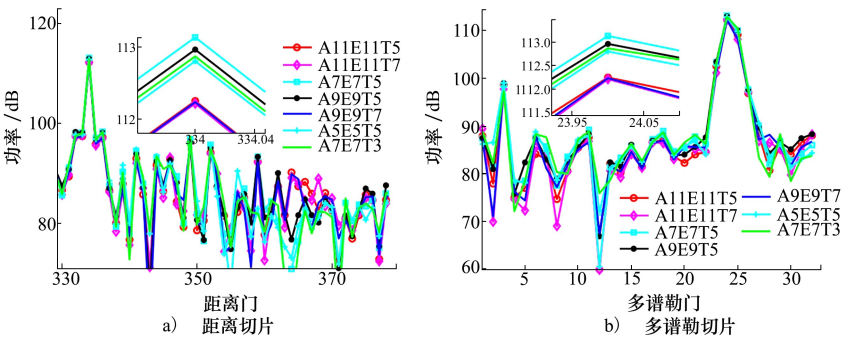


图 19 不同自由度 AETMB-STAP 算法的频谱切片对比图

表 3 不同自由度 AETMB-STAP 算法			
AETMB-STAP 算法	SCNR	计算量	训练样本需求量
(11,11,7)	26.50	$O(27^3)$	54
(11,11,5)	26.54	$O(25^3)$	50
(11,11,3)	25.80	$O(23^3)$	46
(9,9,7)	26.53	$O(23^3)$	46
(9,9,5)	27.26	$O(21^3)$	42
(9,9,3)	26.66	$O(19^3)$	38
(7,7,7)	26.89	$O(19^3)$	38
(7,7,5)	27.43	$O(17^3)$	34
(7,7,3)	27.16	$O(15^3)$	30
(5,5,5)	27.10	$O(13^3)$	26
(5,5,3)	26.66	$O(11^3)$	22

4 结 论

双基杂波非平稳性使得常规 STAP 算法的杂波抑制性能大幅降低,因此,本文将二维空时“十”型杂波抑制思想拓展到方位-俯仰-多普勒三维波束

域双基杂波抑制算法。该算法首先采用空时导向矢量作为变换矩阵将空域数据转换为波束域数据,在此基础上,通过剔除辅助波束域与多普勒域的波束数据,只保留主波束数据,在大幅降低计算量的同时兼顾双基杂波抑制性能。最后,通过平行构型的前向双基雷达杂波仿真验证了该算法的有效性。

参考文献:

- [1] 赵丹丹. 机载雷达协同探测工作方式及杂波抑制方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019
ZHAO Dandan. Research on cooperative detection operation mode and clutter suppression method of airborne radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2019 (in Chinese)
- [2] 蒋长沁. 机载双基雷达非平稳杂波建模与仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2018
JIANG Changqin. Modeling and simulation of nonstationary airborne bistatic radar clutter[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018 (in Chinese)
- [3] 王永良, 魏进武, 陈建文. 双基地机载预警雷达空时二维杂波建模及杂波特性分析[J]. 电子学报, 2001, 29(12A): 1940-1043
WANG Yongliang, WEI Jinwu, CHEN Jianwen. Modelling and characteristics analysis of two dimensional space time clutter for bistatic airborne early warning radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12A): 1940-1043 (in Chinese)
- [4] KREYENKAMP O, KLEMM R. Doppler compensation in forward-looking STAP radar[J]. IEE Radar, Sonar and Navigation, 2001, 148: 253-258
- [5] ZATMAN M. Circular array STAP[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(2): 510-517
- [6] HIMED B, ZHANG Y H, HAJJARI A. STAP with angle-doppler compensation for bistatic airborne radars[C]//IEEE Radar Conference, 2002: 311-317
- [7] DUAN K Q, XU H, YUAN H, et al. Reduced-DOF three-dimensional STAP via subarray synthesis for nonsidelooking planar array airborne radar[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(4): 3311-3325
- [8] WANG Y L, DUAN K Q, XIE W C. Cross beam STAP for nonstationary clutter suppression in airborne radar[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2013, 2013: 276310
- [9] WANG Y L, CHEN J W, BAO Z, et al. Robust space-time adaptive processing for airborne radar in nonhomogeneous clutter environments[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(1): 70-81
- [10] 熊子源. 阵列雷达最优子阵划分与处理研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015
XIONG Ziyuan. The optimal subarray partitioning and processing for array radars[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015 (in Chinese)
- [11] NICKEL U. Array processing for radar: achievements and challenges[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2013, 2013: 261230
- [12] MENG X D, WANG T, WU J X. Short-range clutter suppression for airborne radar by utilizing prefiltering in elevation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(2): 268-272
- [13] HALE T B, TEMPLE M A, RAQUET J F, et al. Localized three-dimensional adaptive spatial-temporal processing for airborne radar[J]. IEE Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(2): 18-22

Dimensionality reduction bistatic radar clutter suppression technique based on three-dimensional cross-beam

CHENG Yufeng¹, LI Yong¹, CHEN Fengfeng², DENG Xiaobo², CHENG Wei¹

(1.School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.AVIC Leihua Electronic Technology Institute, Wuxi 214063, China)

Abstract: Aiming at the problem that the non-stationary of airborne bistatic radar clutter reduces the performance of traditional clutter suppression algorithm, this paper first formulates airborne bistatic radar clutter model, and then analyzes the bistatic radar clutter characteristics in four typical combat scenarios. In addition, in order to reduce the computation burden of the STAP algorithm, a three-dimensional cross-beam clutter suppression algorithm is proposed, which uses the transformation matrix to convert the space-time two-dimensional data into azimuth-elevation-Doppler three-dimensional data. By eliminating auxiliary beam clutter data, only the main beam clutter data which plays a major role in dual-basis clutter suppression is retained to form a three-dimensional cross-beam for local adaptive clutter suppression. The proposed algorithm can greatly reduce the amount of calculation and the demand of training samples, while trying to ensure that the clutter suppression performance does not degrade. The effectiveness of the proposed algorithm is verified by analyzing the clutter suppression effect and computation amount of various algorithms in typical combat scenarios. Therefore, the algorithm has great potential in the applications of airborne bistatic and non-stationary clutter suppression.

Keywords: bistatic radar clutter; clutter suppression; three-dimensional cross-beam; dimensionality reduction algorithm

引用格式:程宇峰, 李勇, 陈峰峰, 等. 基于三维交叉波束的降维双基杂波抑制技术[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(2): 379-388

CHENG Yufeng, LI Yong, CHEN Fengfeng, et al. Dimensionality reduction bistatic radar clutter suppression technique based on three-dimensional cross-beam[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(2): 379-388 (in Chinese)