

# 基于联合稀疏功率谱恢复的 机载雷达稳健 STAP 算法研究

高志奇,陶海红,赵继超

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室,陕西西安 710071)

**摘 要:** 机载雷达信号的空时自适应处理(STAP, Space-Time Adaptive Processing)需要利用样本数据来估计杂波协方差矩阵. 非均匀杂波环境中的离群点会使协方差矩阵的估计出现偏差,从而导致信号相消现象. 针对此问题,本文提出一种基于联合稀疏功率谱恢复的 STAP 算法(JSR-STAP)处理非均匀杂波,以克服离群点对正侧视模式机载雷达的 STAP 性能的影响. JSR-STAP 算法在高分辨稀疏恢复的条件下,利用多快拍间杂波和离群点的分布规律和相关性不同,通过范数选择合适的稀疏恢复系数来实现离群点的抑制. Monte Carlo 实验证明 JSR-STAP 算法的稳健性和动目标检测性能均优于传统的 STAP 算法.

**关键词:** 机载雷达; 空时自适应; 稀疏恢复; 离群点

**中图分类号:** TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)11-2796-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.11.032

## Robust STAP Algorithm Based on Joint Sparse Recovery of Clutter Spectrum for Airborne Radar

GAO Zhi-qi, TAO Hai-hong, ZHAO Ji-chao

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Space-time adaptive processing (STAP) needs to estimate clutter covariance matrix by training sample data. However, this estimation is always corrupted by outliers, which even lead to target self-nulling phenomenon. Hence, a novel robust STAP algorithm based on joint sparse recovery of clutter spectrum is proposed, which can eliminate the influence of outlier. This algorithm is applied in side-looking airborne radar. When the sparse recovery is high resolution, the algorithm exploits the characteristic that distribution and correlation between clutter and outlier are different among multiple snapshots. The norm is employed to select the most suitable sparse recovery coefficients to estimate the clutter spectrum, so outlier can be eliminated effectively. Monte Carlo experiments prove that the proposed algorithm has advantages in robustness and target detection over other conventional STAP algorithms in non-homogeneous clutter environments.

**Key words:** airborne radar; space-time adaptive processing; sparse recovery; outlier

### 1 引言

目前,空时自适应处理(STAP)是抑制机载雷达杂波的主要方法<sup>[1]</sup>. STAP 方法的最优滤波权依赖于杂波协方差矩阵  $\mathbf{R}$  的精确估计. 根据 RMB 准则<sup>[2]</sup>,用于估计  $\mathbf{R}$  的所有样本数据必须满足独立同分布(Independent and Identically Distributed, IID)假设,并且不能包含运动目标信号等杂质信息. 然而实际的杂波环境是非均匀的,特别是样本数据中包含有运动目标信号时, $\mathbf{R}$

的估计会出现较大误差,从而导致 STAP 性能的极大下降. 包含在样本数据中的运动目标信号一般称为离群点<sup>[3]</sup>. 为了克服离群点对 STAP 性能的影响,人们先后提出了广义内积(generalized inner products, GIP)<sup>[4]</sup>和直接数据域(direct data domain, DDD)<sup>[5]</sup>等算法.

基于稀疏功率谱恢复的 STAP 方法(SR-STAP)是近几年研究的热点问题<sup>[6]</sup>. 该类方法借助信号稀疏表示的思想,通过很少的样本数据可以恢复出杂波的功率谱<sup>[7]</sup>. 本文针对离群点抑制问题提出一种基于联合

稀疏功率谱恢复的 STAP 算法(JSR-STAP),它主要利用杂波与离群点的稀疏恢复系数在多快拍间统计规律不同的特点,通过联合稀疏恢复的空时功率谱抑制离群点的影响,提高 STAP 方法的稳健性.

## 2 问题模型

### 2.1 信号模型

机载相控阵雷达在正侧视模式下的工作原理见图 1 所示. 载机的高度和速度分别为  $H$  和  $v_a$ .  $\psi$ 、 $\theta$  和  $\varphi$  分别为空间锥角、俯仰角和方位角. 雷达阵列为  $N$  个阵元组成的均匀线阵,阵元间距为工作波长  $\lambda$  的一半. 阵列在每个相干处理周期内以重复频率  $f_r$  发射  $M$  个脉冲. 雷达系统在每个脉冲周期内对需要观测的  $L$  个距离单元进行采样,然后对回波进行匹配滤波后形成  $N \times M \times L$  维样本数据集,可以排列为图 2 所示形式. 为了便于进行信号处理,每个距离单元的数据矩阵按列的方向排列为  $NM \times 1$  维的列向量  $\mathbf{x}(l)$  ( $1 \leq l \leq L$ ),称为空时快拍数据<sup>[8]</sup>.

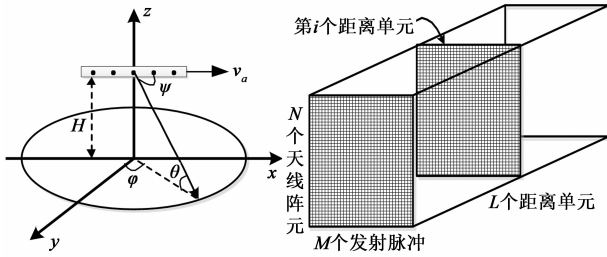


图1 机载雷达工作原理图

图2 雷达数据集

每个距离单元的杂波数据可以看作  $N_c$  个杂波反射点的反射信号之和<sup>[9]</sup>. 第  $i$  个杂波反射点对应的空间频率  $f_{s,i}$  和归一化多普勒频率  $f_{d,i}$  分别定义为

$$f_{s,i} = d \cdot \cos\theta_i \sin\varphi_i / \lambda \quad (1)$$

$$f_{d,i} = 2v_a \cdot \cos\theta_i \sin\varphi_i / (\lambda f_r) \quad (2)$$

其中,  $i = 1, 2, \dots, N_c$ ,  $d$  为阵元间距,  $\theta_i$  和  $\varphi_i$  分别是第  $i$  个杂波反射点的俯仰角和方位角. 第  $i$  个杂波反射点的空时导向矢量可以表示为

$$\mathbf{S} = \boldsymbol{\varphi}_d(f_{d,i}) \otimes \boldsymbol{\varphi}_s(f_{s,i}) \quad (3)$$

其中

$$\boldsymbol{\varphi}_d(f_{d,i}) = [1, \exp(j2\pi f_{d,i}), \dots, \exp(j(M-1)2\pi f_{d,i})]^T \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_s(f_{s,i}) = [1, \exp(j2\pi f_{s,i}), \dots, \exp(j(N-1)2\pi f_{s,i})]^T \quad (5)$$

分别表示时间导向向量和空间导向向量,  $\otimes$  表示 Kronecker 积,  $(\cdot)^T$  表示矩阵转置. 因此, 第  $l$  个距离单元的杂波加噪声快拍数据  $\mathbf{x}(l)$  可以表示为

$$\mathbf{x}(l) = \sum_{i=1}^{N_c} \varepsilon_{c,i} \mathbf{S}(f_{d,i}, f_{s,i}) + \mathbf{n}_0 \quad (6)$$

其中,  $\varepsilon_{c,i}$  表示第  $i$  个杂波反射点的复系数,  $\mathbf{n}_0$  为噪声.

### 2.2 非均匀样本问题

传统 STAP 方法的最优滤波权由下式决定<sup>[10]</sup>:

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}_t / (\mathbf{S}_t^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}_t) \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{S}_t$  为目标的导向矢量,  $(\cdot)^H$  表示共轭转置,  $\mathbf{R}$  为理想的空时杂波协方差矩阵. 实际上  $\mathbf{R}$  是未知的, 只能通过相关距离单元的采样数据估计得到. 其估计表达式为

$$\mathbf{R}_e = \frac{1}{L} \sum_{l=1, l \neq k}^L \mathbf{x}(l) \mathbf{x}^H(l) \quad (8)$$

其中,  $k$  为待检测距离单元. 通常用  $\mathbf{R}_e$  代替式(7)中的  $\mathbf{R}$ . 上述通过样本数据估计协方差矩阵求逆 (samples matrix inverse, SMI) 计算最优滤波权的方法记为 SMI-STAP 方法. 在实际中, STAP 的训练样本数据很难满足 IID 假设, 特别是对于某些特殊的被观测地形 (如高速公路、城市), 训练样本内可能会出现离群点. 如果离群点与被检测的动目标具有相近的多普勒频率, 滤波器会将动目标当作杂波滤除, 即动目标信号相消现象<sup>[11]</sup>. 为克服离群点的影响, 人们提出了 GIP 和 DDD 等多种算法, 但 GIP 在离群点的功率较强或个数较多时效果不佳<sup>[12]</sup>, 而 DDD 由于部分空时自由度的损失会使算法性能降低<sup>[5]</sup>.

## 3 JSR-STAP 算法

### 3.1 SR-STAP 算法原理<sup>[13]</sup>

将式(6)代入式(8)可得杂波协方差矩阵的估计为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_e &= E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^H\} \\ &= E\left\{\left(\sum_{i=1}^{N_c} \varepsilon_{c,i} \mathbf{S}(f_{d,i}, f_{s,i}) + \mathbf{n}_0\right) \cdot \left(\sum_{j=1}^{N_c} \varepsilon_{c,j} \mathbf{S}(f_{d,j}, f_{s,j}) + \mathbf{n}_0\right)^H\right\} \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $E\{\cdot\}$  表示取均值. 通常假设不同杂波散射点的信号互不相干, 即

$$E\{\varepsilon_{c,i} \varepsilon_{c,j}^*\} = E\{\varepsilon_{c,i}\} E\{\varepsilon_{c,j}^*\} = 0, \forall i, j; i \neq j \quad (10)$$

如果进一步假设噪声与杂波统计独立, 则式(9)可以简化为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_e &= \sum_{i=1}^{N_c} E\{|\varepsilon_{c,i}|^2\} \mathbf{S}(f_{d,i}, f_{s,i}) \\ &\quad \mathbf{S}^H(f_{d,i}, f_{s,i}) + \sigma^2 \mathbf{I} \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $E\{|\varepsilon_{c,i}|^2\}$  表示杂波在空时平面上的功率分布, 即杂波功率谱;  $\sigma^2$  表示噪声的功率,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵. 对于正侧视机载雷达, 第  $i$  个杂波反射点的空间锥角  $\psi_i$  与其归一化多普勒频率  $f_{d,i}$  之间存在以下耦合关系:

$$f_{d,i} = 2v_a \cos\psi_i / (\lambda f_r) \quad (12)$$

因此, 杂波主要集中分布在由式(12)决定的杂波脊上. 如果将杂波所在的空时平面划分为  $NM \times N_s N_d$  个单元格 ( $N_s = \rho_s N$  为空间角度分辨单元数;  $N_d = \rho_d M$  为

多普勒分辨单元数;  $\rho_s$  和  $\rho_d$  表示离散化程度, 通常为大于 1 的正整数<sup>[14]</sup>, 则式(6)可改写为

$$\mathbf{x}(l) = \sum_{i=1}^{N_s N_d} \varepsilon_{c,i} \mathbf{S}(f_{d,i}, f_{s,i}) + \mathbf{n}_0 = \Phi \boldsymbol{\alpha} + \mathbf{n}_0 \quad (13)$$

其中  $\Phi$  是由空时导向矢量构成的超完备基矩阵(即字典), 可以表示为

$$\Phi = [\mathbf{S}(f_{d,1}, f_{s,1}), \dots, \mathbf{S}(f_{d,1}, f_{s,N_s}), \dots, \mathbf{S}(f_{d,N_s}, f_{s,1}), \dots, \mathbf{S}(f_{d,N_s}, f_{s,N_s})]_{NM \times N_s N_d} \quad (14)$$

列向量  $\boldsymbol{\alpha}$  为快拍数据在字典  $\Phi$  下的复数幅度, 表示为

$$\boldsymbol{\alpha} = [\varepsilon_{c,1}, \varepsilon_{c,2}, \dots, \varepsilon_{c,N_s N_d}]^T \quad (15)$$

对于高分辨情况 ( $N_s N_d \gg NM$ ), 空时平面划分较细, 则  $\Phi$  中包含较多的空时导向矢量, 因而稀疏恢复精确度较高, 杂波主要集中在杂波脊线上, 见图 3 所示. 由于杂波占据的空时单元非常有限, 因此向量  $\boldsymbol{\alpha}$  具有稀疏性. 显然,  $\boldsymbol{\alpha}$  的显著分量对应杂波脊, 而其他微弱分量对应噪声. 在已知字典  $\Phi$  的情况下, 快拍数据对应的稀疏向量  $\boldsymbol{\alpha}$  可以根据最小化范数的方法进行恢复, 即

$$\boldsymbol{\alpha}' = \operatorname{argmin} \|\boldsymbol{\alpha}\|_1 \quad \text{subject to } \|\mathbf{x} - \Phi \boldsymbol{\alpha}\|_2 < \eta \quad (16)$$

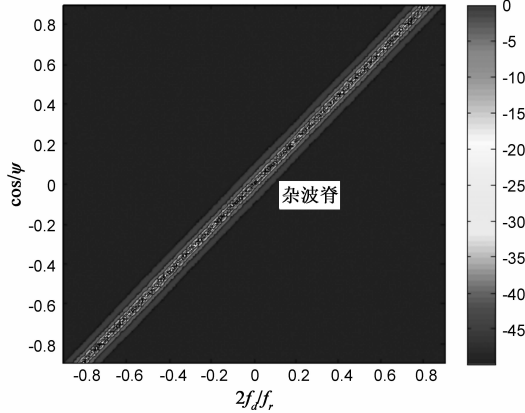


图3 高分辨稀疏恢复杂波功率谱

其中,  $\|\cdot\|_p$  表示  $l_p$  范数 ( $p=1,2$ ),  $\eta$  表示稀疏恢复的容许误差, 一般取决于噪声功率<sup>[7]</sup>. 由于不同快拍数据中的杂波在空时平面的分布存在差异, 因此最终估计出的  $\boldsymbol{\alpha}'$  通常取多快拍恢复结果的平均值<sup>[7]</sup>, 即

$$\boldsymbol{\alpha}' = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \boldsymbol{\alpha}'_l \quad (17)$$

然后利用  $\boldsymbol{\alpha}'$ , 通过式(13)、式(8)和式(7)计算 STAP 的最优滤波权.

### 3.2 JSR-STAP 算法

虽然上述 SR-STAP 算法可以用很少的快拍实现杂波功率谱的估计, 但依然要求快拍具有 IID 特性. 此方法没有考虑多快拍之间的相关性, 仅进行了简单的平均处理, 因此极易受到离群点的影响而出现明显的恢复误差, 甚至是伪峰<sup>[15]</sup>. 针对上述问题, 本文提出一种改进的 JSR-STAP 算法, 利用快拍间杂波分布的相关性

加强稀疏恢复的稳健性, 以克服离群点的影响.

假设快拍  $\mathbf{x}(l)$  ( $l=1,2,\dots,L$ ) 满足式(16)表示的最优化问题, 通过稀疏方法分别恢复它们在字典  $\Phi$  下的系数向量  $\boldsymbol{\alpha}'_l$ , 并构成系数矩阵  $\mathbf{A}$ .

$$\mathbf{A} = [\boldsymbol{\alpha}'_1, \boldsymbol{\alpha}'_2, \dots, \boldsymbol{\alpha}'_L]_{N_s N_d \times L} \quad (18)$$

对矩阵  $\mathbf{A}$  的每一行分别计算  $l_2$  范数, 即

$$\|\mathbf{A}(i, :)\|_2 = \|\boldsymbol{\alpha}'_1(i), \boldsymbol{\alpha}'_2(i), \dots, \boldsymbol{\alpha}'_L(i)\|_2 \quad (19)$$

将式(19)所得列向量按元素值由大到小顺序记录其位置, 并构成集合  $\Gamma$ . 按如下过程估计杂波协方差矩阵:

**step1:** 对于快拍数据  $\mathbf{x}(l)$ , 依次选择  $\Gamma$  中的第  $j$  个 ( $j=1,2,\dots,N_s N_d$ ) 元素, 计算稀疏恢复的残差为

$$\Delta_l(j) = \left\| \mathbf{x}(l) - \sum_j K_{l,j} \Phi(:, \Gamma(j)) \boldsymbol{\alpha}'_l(\Gamma(j)) \right\|_2^2 \quad (20)$$

其中

$$K_{l,j} = \exp[-|\boldsymbol{\alpha}'_l(\Gamma(j)) - \bar{\boldsymbol{\alpha}}(\Gamma(j))|^2 / \sigma_j^2] \quad (21)$$

$$\bar{\boldsymbol{\alpha}}(\Gamma(j)) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \boldsymbol{\alpha}'_l(\Gamma(j)) \quad (22)$$

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L |\boldsymbol{\alpha}'_l(\Gamma(j)) - \bar{\boldsymbol{\alpha}}(\Gamma(j))|^2 \quad (23)$$

**step2:** 如果残差满足

$$\Delta_l(j) < \xi \quad (24)$$

或者满足  $j = N_s N_d$ , 则进入 step3; 否则, 令  $j = j + 1$ , 返回 step1. 其中,  $\xi$  为误差容许门限, 与噪声功率有关.

**step3:** 估计第  $l$  个快拍的相关矩阵为

$$\mathbf{R}_c(l) = \sum_j K_{l,j}^2 |\boldsymbol{\alpha}'_l(\Gamma(j))|^2 \Phi(:, \Gamma(j)) \Phi^H(:, \Gamma(j)) \quad (25)$$

$L$  个快拍数据的相关矩阵都按照上述方法估计之后, 计算它们的平均值, 即

$$\mathbf{R}_{av} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{R}_c(l) \quad (26)$$

用  $\mathbf{R}_{av}$  代替式(7)中的  $\mathbf{R}$  就可以得到最优滤波权  $\mathbf{W}$ .

根据 STAP 理论, 杂波在空时平面会占据一定数目的空间和多普勒频率位置, 且在多快拍间的分布规律相同; 而离群点只出现在特定的空间和多普勒频率位置, 且只包含在单个快拍中<sup>[15]</sup>. 式(19)中计算不同快拍对于相同空时导向矢量的稀疏恢复系数  $l_2$  范数, 可以将不同快拍之间的稀疏约束相互增强<sup>[15]</sup>. 如果不同快拍的恢复系数均在向量  $\boldsymbol{\alpha}$  的第  $k$  个元素处具有显著值, 则该元素对应杂波, 且其  $l_2$  范数值较大; 否则, 其  $l_2$  范数值相对较小. 因此  $l_2$  范数的操作使得杂波的位置得以突出, 既有利于杂波功率谱的准确估计, 也可有效克服离群点的影响. 式(20)中的加权系数  $K_{l,j}$  主要是抑制出现在个别快拍中的离群点, 由于其具有高斯指数形式, 对于在所有快拍中均匀分布的显著点没有影响, 而只在个别快拍中出现的显著点的幅度会被明显削弱.

因此,JSR-STAP 算法利用多快拍联合稀疏恢复系数矩阵的  $l_2$  范数使杂波的位置凸显出来,同时利用高斯指数加权削弱了离群点的影响,可以避免杂波功率谱中伪峰的出现.

#### 4 性能分析

本节将通过仿真分析 JSR-STAP 算法的性能. 主要仿真参数见表 1 所示. 仿真实验选择了包含单个离群点的 40 个距离单元快拍数据作为训练样本,以形成自适应滤波权. 另外还选择了 221 号-320 号距离单元的快拍数据作为测试样本,以检测算法的性能. 其中,第 260 号距离单元的样本数据中包含一个待检测动目标信号,该信号与训练样本中的离群点具有相同的多普勒频率和方位角. JSR-STAP 算法中,取  $\rho_s = \rho_d = 6$ ,误差容许门限为  $\xi = 0.01$ . 仿真实验对比了 JSR-STAP、SMI-STAP<sup>[8]</sup>、GIP-STAP<sup>[16]</sup> 和 DDD<sup>[5]</sup> 四种算法的性能. 以下仿真结果均为 100 次 Monte Carlo 实验的平均结果.

##### 4.1 稀疏恢复系数特性分析

图 4(a) 给出了含离群点快拍的稀疏恢复系数,其中的显著值点主要对应于杂波,但离群点对应的系数(序号为  $k = 2910$ )也较大,如利用这些系数估计杂波的功率谱,会出现伪峰. 图 4(b) 给出了多快拍稀疏恢复系数的  $l_2$  范数. 可看出,显著值的分布规律与图 4(a) 比较接近,即多快拍间公共显著点的位置得到了加强,但  $k = 2910$  处的幅值相对较低. 根据 3.2 节给出的算法流程,该点在集合  $\Gamma$  中的排序靠后,因此在估计杂波功率谱时被选中的概率较小,可以有效抑制离群点的影响.

表 1 仿真参数

参数	数值	单位	参数	数值	单位
$N$	10	—	动目标信号噪声比	0	dB
$M$	10	—	动目标信号方位角	$0^\circ$	—
$\lambda$	0.3	m	动目标归一化多普勒频率	-0.71	—
$H$	3000	m	离群点信号噪声比	50	dB
$v_a$	300	m/s	离群点方位角	$0^\circ$	—
$f_r$	4000	Hz	离群点归一化多普勒频率	-0.71	—
雷达扫描方式	正侧视	—	杂波噪声比	60	dB

##### 4.2 杂波空时功率谱分析

图 5(a) ~ (d) 分别给出了 JSR-STAP、SMI-STAP、GIP-STAP 和 DDD 四种算法估计得到的杂波功率谱. 可看出,JSR-STAP 算法形成的空时功率谱完全集中在杂波脊线上;SMI-STAP 算法的杂波功率谱在离群点位置有明显的输出,表示其对于离群点的抑制性能较差;GIP-STAP 算法形成的杂波功率谱在整个空时平面都分

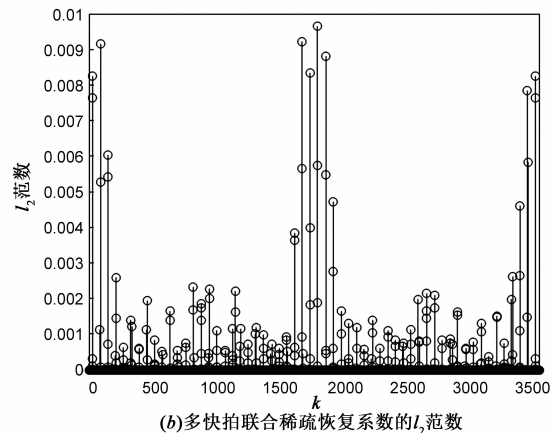
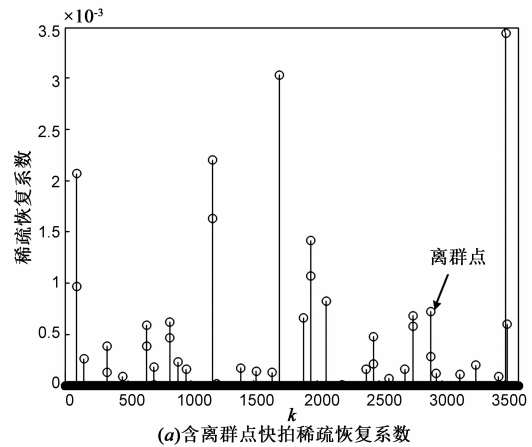


图 4 稀疏恢复特性

布有较强的干扰;DDD 算法形成的杂波功率谱虽然主要集中于杂波脊线上,但在离群点位置依然有明显输出. 因此,JSR-STAP 算法可以很好地抑制离群点的影响.

##### 4.3 杂波抑制性能分析

第三个实验对比分析 JSR-STAP、SMI-STAP、GIP-STAP 和 DDD 四种算法的杂波抑制性能. 图 6 为四种 STAP 算法在训练样本中包含一个离群点时的算法改善因子 (Improved factor, IF) 曲线. 可看出,SMI-STAP 和 DDD 算法在离群点多普勒频率位置出现了零陷,主要是由于训练样本中的离群点使得杂波协方差矩阵的估计出现了偏差. GIP-STAP 算法虽然在主杂波区域以外没有出现较深零陷,但其 IF 曲线起伏较大且主杂波位置零陷较浅,表明其杂波抑制能力较差. JSR-STAP 算法的 IF 曲线只是在主杂波区产生零陷,且其深度比 SMI-STAP 算法和 DDD 算法多 5dB,说明该算法形成的自适应滤波权不受离群点的影响,同时杂波抑制能力强.

##### 4.4 动目标距离向输出分析

第四个实验对比分析 JSR-STAP、SMI-STAP、GIP-STAP 和 DDD 四种算法对于测试样本中动目标的检测能力. 图 7 表示四种 STAP 算法对测试样本的滤波结

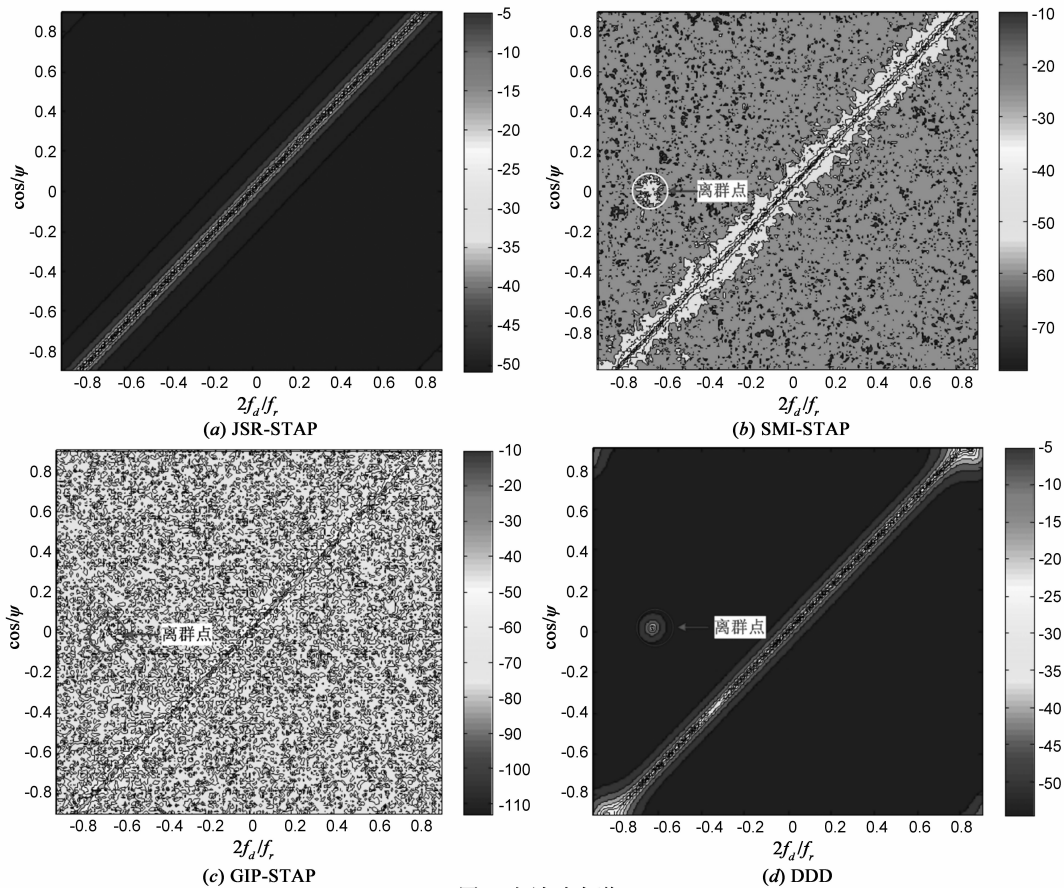


图5 杂波功率谱

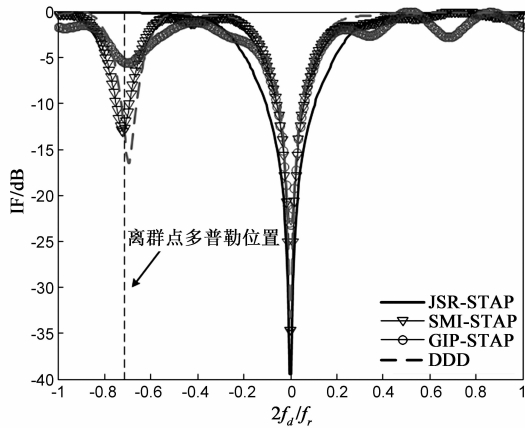


图6 改善因子

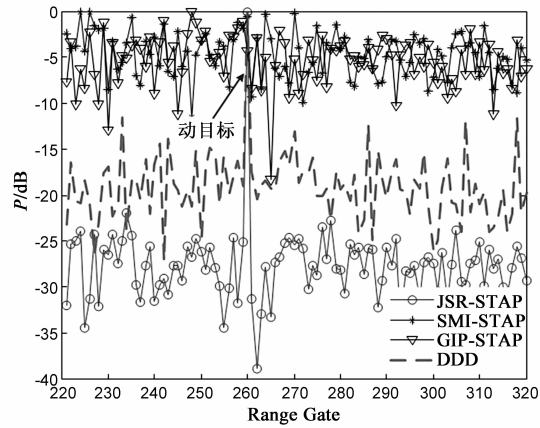


图7 输出功率

果. 由于训练样本中离群点与测试样本中动目标的多普勒频率相同, SMI-STAP 和 GIP-STAP 算法无法有效识别包含在测试样本中的动目标信号, 即产生了严重的信号相消现象; DDD 算法不需要训练样本, 只利用当前测试样本形成滤波权, 因此可以有效检测出动目标信号; JSR-STAP 算法可以完全克服离群点的影响, 较好地检测出动目标信号. 比较而言, JSR-STAP 算法比 DDD 算法的输出信噪比高约 10dB, 主要因为 DDD 算法有一

定的系统自由度损失.

### 5 结论

本文研究了基于多快拍联合稀疏功率谱恢复的稳健 STAP 算法. 该算法主要针对正侧视模式的机载雷达因训练样本中包含离群点而造成严重的信号相消现象, 导致动目标检测失败的问题. JSR-STAP 算法在高分辨稀疏恢复的条件下, 利用了多快拍间杂波和离群点的相关性和

统计规律不同的特点,通过  $l_2$  范数选择合适的稀疏恢复系数,并采用高斯加权的方式消除离群点的影响,增强算法的稳健性.仿真实验证明,JSR-STAP 算法在训练样本较少的条件下,可以抑制离群点对于动目标检测的影响,其性能优于现有的典型稳健 STAP 算法.

#### 参考文献

- [1] 王永良,刘维建,谢文冲,等.机载雷达空时自适应检测方法研究进展[J].雷达学报,2014,3(2):201-207.  
Wang Yongliang, et al. Research progress of space-time adaptive detection for airborne radar[J]. Journal of Radars, 2014, 3(2):201-207. (in Chinese)
- [2] 阳召成,等.基于空时功率谱稀疏性的空时自适应处理技术研究进展[J].电子学报,2014,42(6):1194-1203.  
Yang Zhaocheng, et al. An Overview of space-time adaptive processing technology based on sparsity of space-time power spectrum[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(6):1194-1203. (in Chinese)
- [3] S Kang, et al. Analysis of space-time adaptive processing performance using K-means cluster algorithm for normalization method in non-homogeneity detector process[J]. IET Signal Process, 2011, 5(2):113-120.
- [4] 刘聪锋,廖桂生.稳健的对角加载广义内积算法[J].西安电子科技大学学报,2009,36(4):583-589.  
Liu Congfeng, Liao Guisheng. Robust generalized Inner products algorithm using diagonal loading[J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(4):583-589. (in Chinese)
- [5] 孙珂,张颢,李刚,等.基于稀疏恢复的直接数据域 STAP 算法[J].清华大学学报,2011,51(7):972-976.  
Sun Ke, Zhang Hao, Li Gang, et al. Direct data STAP algorithm using sparse recovery[J]. Journal of Tsinghua University, 2011, 51(7):972-976. (in Chinese)
- [6] 马泽强,等.基于稀疏恢复的空时二维自适应处理技术研究现状[J].雷达学报,2014,3(2):217-228.  
Ma Zeqiang, Wang Xiqin, Liu Yimin, et al. An overview on sparse recovery-based of STAP[J]. Journal of Radars, 2014, 3(2):217-228. (in Chinese)
- [7] 孙珂,张颢,李刚,等.基于杂波谱稀疏恢复的空时自适应处理[J].电子学报,2011,39(6):1389-1395.  
Sun Ke, Zhang Hao, Li Gang, et al. STAP via sparse recovery of clutter spectrum[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6):1389-1395. (in Chinese)
- [8] W L Melvin. A STAP overview[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 19(1):19-35.
- [9] 文才,王彤,吴建新.直接数据域迭代空时自适应处理方法[J].系统工程与电子技术,2014,36(5):831-837.  
Wen Cai, et al. Direct data domain approach with iterative space-time adaptive processing[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(5):831-837. (in Chinese)
- [10] 王泽涛,等.基于 SA-MUSIC 理论的联合稀疏恢复 STAP 算法[J].电子学报,2015,43(5):846-853.  
Wang Zetao, et al. A joint sparse recovery STAP method based on SA-MUSIC[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(5):846-853. (in Chinese)
- [11] 范西昆,曲毅.知识辅助机载雷达杂波抑制方法研究进展[J].电子学报,2012,40(6):1199-1206.  
Fan Xikun, Qu Yi. An overview of knowledge-aided clutter mitigation methods for airborne radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(6):1199-1206. (in Chinese)
- [12] Xiaopeng Yang, Yongxu Liu, Teng Long. Robust non-homogeneity detection algorithm based on prolate spheroidal wave functions for space-time adaptive processing[J]. IET Radar Sonar Navig, 2013, 7(1):47-54.
- [13] Sun K, Zhang H, Li G. A novel STAP algorithm using sparse recovery technique[A]. Proc IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Cape Town, South Africa, 2009. 336-339.
- [14] 沈明威,等.基于降维稀疏重构的高效数据域 STAP 算法研究[J].电子学报,2014,42(11):2286-2290.  
Shen Mingwei, Wang Jie, Wu Di, et al. An efficient data domain STAP algorithm based on reduced-dimension sparse reconstruction[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(11):2286-2290. (in Chinese)
- [15] 王军华,黄知涛,周一宇,等.基于近似  $l_0$  范数的稳健稀疏重构算法[J].电子学报,2012,40(6):1185-1189.  
Wang Junhua, et al. Robust sparse recovery based on approximate  $l_0$  norm[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(6):1185-1189. (in Chinese)
- [16] 郭佳佳,廖桂生,杨志伟,等.利用广义内积值迭代加权的空时协方差矩阵估计方法[J].电子与信息学报,2014,36(2):422-427.  
Guo Jiajia, et al. Iterative weighted covariance matrix estimation method for STAP based on generalized inner products[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(2):422-427. (in Chinese)

#### 作者简介



高志奇 男,1980 年生于内蒙古五原县,博士研究生,讲师,主要研究方向为空时自适应信号处理.  
E-mail: gzqnd@163.com

陶海红 女,1976 年生于安徽亳州,博士,教授,从事信号与信息处理的研究与教学工作,主要研究方向为信号波形优化设计和自适应波束形成及智能方法在信号处理上的应用.