

# 基于稀疏恢复的 MIMO-STAP 干扰样本检测方法

何 团, 唐 波, 张 进, 张 玉

(国防科技大学电子对抗学院, 合肥, 230037)

**摘要** 针对机载多输入多输出(MIMO)雷达空时自适应处理(STAP)技术在训练样本存在有源干扰时杂波抑制性能严重下降的问题,提出了一种干扰样本检测方法。首先使用正则化 FOCUSS 算法估计出各原子的空时功率谱值,接着设置谱值门限将谱值较大的原子取出,然后确定扫描带对空时二维平面进行扫描,最后根据进入扫描带最大原子数占总原子数的比例判别训练样本是否存在干扰。仿真实验表明,该方法可有效检测出训练样本中的干扰,使用该方法挑选出的无干扰训练样本恢复杂波谱可保证空时滤波器的杂波抑制性能,提升稀疏算法求解杂波谱时涉及到的样本的可靠性。

**关键词** 多输入多输出;空时自适应处理;稀疏恢复;干扰样本检测

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.06.015

**中图分类号** TN957 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)06-0097-07

## Sample with Jamming Detection Method of MIMO-STAP Based on Sparse Recovery

HE Tuan, TANG Bo, ZHANG Jin, ZHANG Yu

(College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

**Abstract:** Aimed at the problem that the clutter suppression performance of multiple-input multiple-output radar space-time adaptive processing technology is greatly degraded when the training samples are in jam, a jamming detection method is proposed. This method firstly uses the regularized FOCUSS algorithm to estimate the space-time power spectrum of each atom. Next, the spectrum threshold is set to pick up atoms with large values. Then, the scanning band is determined to scan the space-time two-dimensional plane. Finally, according to the ratio of the maximum number of atoms entering the scanning band to the total number of atoms, a determination can be made whether there is jamming in the training sample. The simulation results show that this method can effectively detect the jamming in the training samples, and the clutter suppression performance of space-time filter can be guaranteed by using the training samples selected by this method.

**Key words:** multiple-input multiple-output (MIMO); space-time adaptive processing (STAP); sparse recovery; jamming sample detection

空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)技术<sup>[1]</sup>是机载雷达在强杂波背景下

收稿日期: 2019-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(61701528)

作者简介: 何 团(1994—),男,四川遂宁人,硕士生,主要从事 MIMO 雷达空时自适应处理研究。E-mail:hetuandyx@163.com

**引用格式:** 何团,唐波,张进,等.基于稀疏恢复的 MIMO-STAP 干扰样本检测方法[J].空军工程大学学报(自然科学版),2019,20(6):97-103.  
HE Tuan, TANG Bo, ZHANG Jin, et al. Sample with Jamming Detection Method of MIMO-STAP Based on Sparse Recovery[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(6): 97-103.

检测运动目标的关键技术。STAP 技术的关键是获取待检测距离单元精确的杂波协方差矩阵。根据 RMB(Reed-Mallett-Brennan) 准则<sup>[2]</sup>, 要使估计杂波协方差矩阵带来的杂波抑制性能损失小于 3 dB, 所需独立同分布训练样本数至少为 2 倍系统自由度。然而, 实际的 STAP 场景复杂多变, 除了杂波以外, 还可能存在着有源干扰<sup>[3-4]</sup>。有源干扰会使得训练样本的非均匀性更加严重, 如果将包含有源干扰的训练样本用于估计杂波协方差矩阵, 则会使杂波抑制性能严重下降。

针对训练样本存在的有源干扰问题, 文献[5]提出了一种基于系统辨识的训练样本挑选方法, 该方法将协方差矩阵的相似性作为挑选依据。文献[6]提出了一种基于矩阵相似度的 STAP 非均匀样本挑选方法, 该方法从受污染样本与干净样本的差异性度量角度入手, 根据相似度的不同实现对受污染样本的剔除。文献[7]提出了一种基于稀疏重构技术的训练样本挑选方法, 该方法利用杂波多普勒与角度的先验信息剔除角度一距离谱上明显偏离角度期望的训练样本。文献[8]提出了一种基于先验信息稀疏恢复的非均匀样本检测方法, 该方法将先验信息和广义内积(GIP)法相结合, 提升了传统 GIP 方法的稳健性。文献[9]提出了一种基于杂波稀疏恢复的 STAP 训练样本挑选方法, 该方法充分利用了训练样本的稀疏性, 选取与待检测单元样本杂波位置相似的样本。

近年来, 稀疏恢复技术被应用到 STAP 中, 只需少量训练样本即可实现杂波谱的精确恢复<sup>[10-11]</sup>。而多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)雷达 STAP 技术因为能够实现更好的性能<sup>[12-13]</sup>, 稀疏恢复技术也慢慢扩展到了 MIMO-STAP 中。基于稀疏恢复的 STAP 方法因其需要的训练样本数较少, 故存在着有源干扰时造成的影响会相对较大。本文针对 MIMO-STAP 训练样本存在着有源干扰时杂波抑制性能严重下降的问题, 提出了一种干扰样本检测方法, 该方法先用正则化 FO-CUSS 算法找出空时功率谱值较大的原子, 然后设计扫描带对空时二维平面进行扫描, 通过进入扫描带最大原子数占总原子数的比例判断其是否存在干扰。该方法简单、易行, 能够准确地判断出训练样本是否存在有源干扰。

## 1 问题建模

### 1.1 存在着有源干扰时的信号模型

图 1 为机载 MIMO 雷达在正侧视条件下的几何模型<sup>[14]</sup>, 其中  $\varphi$  为杂波块的俯仰角,  $\theta$  为杂波块的方位角,  $\Phi$  为线阵方向与杂波块方向所成的空间锥

角,  $V$  为载机速度,  $h$  为载机距离地面的高度。

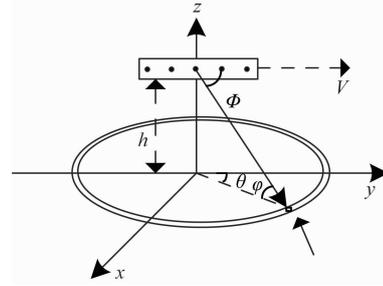


图 1 机载 MIMO 雷达几何模型

设均匀线阵体制下机载 MIMO 雷达发射的各波形满足正交关系, 通过匹配滤波, 可以在接收端分离出各个发射阵元信号。发射阵元个数为  $M$ , 接收阵元个数为  $N$ ; 1 个相干处理间隔(Coherent Processing Interval, CPI)内发射  $K$  个脉冲, 脉冲重复频率为  $f_r$ , 工作波长为  $\lambda$ ; 发射阵元间距和接收阵元间距分别为  $d_t$  和  $d_r$  (一般为避免栅瓣问题, 假定  $d_r = \lambda/2$ )。

设  $\varphi_l$  为第  $l$  个距离环的俯仰角, 将第  $l$  个距离环均匀切分为  $N_c$  个杂波块,  $\theta_p$  为第  $p$  个杂波块的方位角。杂波块的空间频率为  $f_s$ , 多普勒频率为  $f_d$ , 则对应的空时导向矢量为:

$$\mathbf{v}(f_d, f_s) = \mathbf{v}_d(f_d) \otimes \mathbf{v}_t(f_s) \otimes \mathbf{v}_r(f_s) \quad (1)$$

式中:  $\otimes$  表示 Kronecker 积;  $\mathbf{v}_t$  为发射导向矢量;  $\mathbf{v}_r$  为接收导向矢量;  $\mathbf{v}_d$  为时域导向矢量。发射和接收导向矢量分别为:

$$\mathbf{v}_t(f_s) = [1 \ e^{j2\pi\gamma f_s} \ \dots \ e^{j2\pi(M-1)\gamma f_s}]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{v}_r(f_s) = [1 \ e^{j2\pi f_s} \ \dots \ e^{j2\pi(N-1)f_s}]^T \quad (3)$$

式中:  $\gamma$  为发射阵元间距与接收阵元间距之比。

空间频率  $f_s$  与  $\theta_p, \varphi_l$  关系式为:

$$f_s(\theta_p, \varphi_l) = d_r \cos\theta_p \cos\varphi_l / \lambda \quad (4)$$

时域导向矢量为:

$$\mathbf{v}_d(f_d) = [1 \ e^{j2\pi f_d} \ \dots \ e^{j2\pi(K-1)f_d}]^T \quad (5)$$

式中: 多普勒频率  $f_d$  与  $\theta_p, \varphi_l$  的关系式为:

$$f_d(\theta_p, \varphi_l) = 2V \cos(\theta_p) \cos\varphi_l / (\lambda f_r) \quad (6)$$

则第 1 个距离环的杂波信号可表示为:

$$\mathbf{x}_c^l = \sum_{p=1}^{N_c} \sigma_p \mathbf{v}(f_{d,p}, f_{s,p}) \quad (7)$$

式中:  $\sigma_p$  为第  $p$  个杂波块的回波幅度;  $\mathbf{v}(f_{d,p}, f_{s,p})$  为第  $p$  个杂波块的空时导向矢量。

本文考虑的场景为干扰只可能存在于训练样本, 不存在于待检测距离单元。考虑的有源干扰模型为一种有源压制性干扰<sup>[15]</sup>, 具体如图 2 所示。

一般有源干扰都具有很强的功率, 会导致不同训练样本的统计特性差异很大。当训练样本存在着有源干扰时, 当然首先考虑的是将有源干扰去除, 使训

训练样本依旧可用来估计杂波协方差矩阵。但有源干扰的功率谱和杂波功率谱存在交叠部分,在不使用另外的无源接收机的前提下无法将此重叠部分分开,故只能考虑检测训练样本是否存在干扰,并将存在干扰的训练样本剔除。

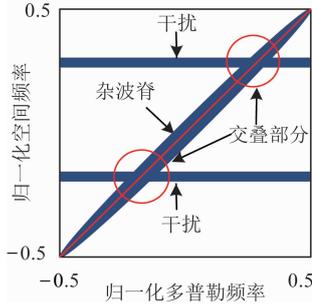


图 2 有源干扰示意图

假如某距离单元存在  $T$  个独立有源干扰,设第  $p(p=1,2,\dots,T)$  个干扰的空间频率为  $f_{s,p}$ ,功率为  $\sigma_{j,p}^2$ ,则干扰协方差阵矩阵可表示为:

$$\mathbf{R}_j = \mathbf{I}_{MK} \otimes \mathbf{R}_{rj} = \mathbf{I}_{MK} \otimes \left[ \sum_{p=1}^T \sigma_{j,p}^2 \mathbf{v}_r(f_{s,p}) \mathbf{v}_r^H(f_{s,p}) \right] \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{I}_{MK}$  为  $KM \times KM$  的单位矩阵;  $\mathbf{v}_r(f_{s,p})$  为第  $p$  个干扰的接收导向矢量。

设  $\mathbf{v}_{j,p}$  表示第  $p$  个有源干扰的矢量信号,则可将第  $l$  个距离单元所有的有源干扰信号表示为:

$$\mathbf{x}_j^l = \sum_{p=1}^T \mathbf{v}_{j,p} \quad (9)$$

则第  $l$  个距离单元包含的所有信号可表示为:

$$\mathbf{x}_l^l = \mathbf{x}_c^l + \mathbf{x}_j^l + \mathbf{n} \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{n}$  为噪声矢量。

### 1.2 杂波谱稀疏恢复模型

一般情况下,为获得稀疏恢复所需的字典,需将整个空时二维平面网格化,将所有网格节点对应的空时导向矢量取出组成字典矩阵。假设将空间频率  $f_s$  和多普勒频率  $f_d$  分别离散化为  $N_s$  格和  $N_d$  格。

杂波分布在空时二维平面上具有稀疏性<sup>[16]</sup>,可由超完备字典近似表示为:

$$\mathbf{x}_c = \sum_{i=1}^{N_d} \sum_{j=1}^{N_s} \sigma_{i,j} \mathbf{v}(f_{d,i}, f_{s,j}) = \boldsymbol{\psi} \boldsymbol{\sigma} \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{v}(f_{d,i}, f_{s,j})$  表示空时二维平面上空间频率为  $f_{s,j}$ 、多普勒频率为  $f_{d,i}$  时所对应的空时导向矢量;  $\sigma_{i,j}$  为其幅度值;  $\boldsymbol{\psi}$  为稀疏恢复使用的字典矩阵;  $\boldsymbol{\sigma}$  为待求的稀疏参数矢量。

一般情况下,稀疏恢复的目的就是确定矢量  $\boldsymbol{\sigma}$ ,则杂波谱的稀疏恢复问题最终可表示为:

$$\begin{aligned} & \min_{\boldsymbol{\sigma}} \|\boldsymbol{\sigma}\|_0 \\ & \text{s. t. } \|\mathbf{y} - \boldsymbol{\psi} \boldsymbol{\sigma}\|_2 \leq \epsilon \end{aligned} \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{y}$  为不含目标信号的观测信号矢量;  $\epsilon$  为噪声带来的误差阈值。

在求得稀疏参数矢量后,即可求得杂波的空时功率谱为:

$$\mathbf{P} = \boldsymbol{\sigma} \odot \boldsymbol{\sigma}^* \quad (13)$$

但在有源干扰条件下,求得的空时功率谱将不仅仅包括杂波成分,还包括有源干扰成分,此时得到的协方差矩阵就不能用来估计待检测单元的杂波协方差矩阵。因此,必须考虑将包含有源干扰的训练样本剔除。

## 2 干扰样本检测方法

### 2.1 MIMO-STAP 有源干扰稀疏性分析

通过有源干扰的协方差矩阵模型可知,其功率谱在空时二维平面呈现为空间频率固定、多普勒频率白化的窄带。

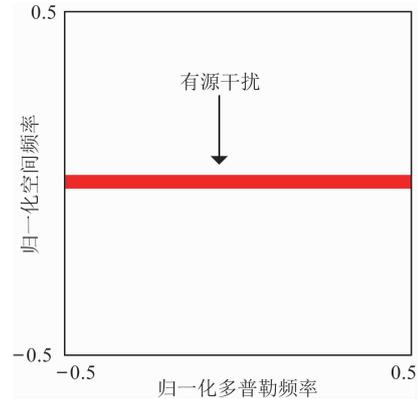


图 3 有源干扰功率谱

从功率谱的角度看,有源干扰对应的  $MNK \times 1$  维的矢量信号存在着被字典原子稀疏表示的可能。

但通过分析可以发现,字典中每个原子都是由发射导向矢量、接收导向矢量和时域导向矢量三者构成。而有源干扰信号来自于其他外辐射源,与机载 MIMO 雷达发射阵元无关,故有源干扰信号中不存在发射导向矢量成分。也就是说,有源干扰信号并不能由字典原子严格稀疏表示,除非 MIMO 雷达发射阵元数为 1,即 MIMO 雷达退化为 SIMO 雷达状态,此时则不再涉及到发射导向矢量。在这种条件下,有源干扰信号才能被字典原子严格稀疏表示。

MIMO-STAP 中有源干扰虽不能被字典原子严格稀疏表示,但却可以被字典原子近似表示。虽然这种近似表示精度很低,但却足以用来判断训练样本中是否存在干扰。

### 2.2 训练样本干扰检测方法

要找出有源压制性干扰,可以从几何角度考虑。首先使用正则化 FOCUSS 算法<sup>[17]</sup>处理各训练样本。

在正则化 FOCUSS 算法处理各训练样本后,即

可求得各原子的空时功率谱值。设置谱值门限将那些谱值较小的原子剔除,保留其中谱值较大的原子,这些原子在图4中由“+”表示。找到这些原子在空时二维平面上的对应点,并确定相应的空时坐标值。

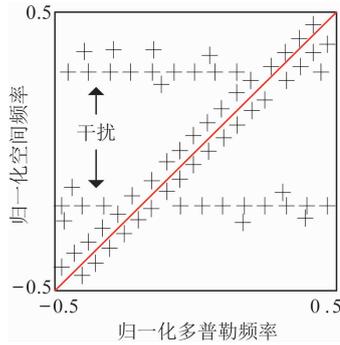


图4 谱值较大原子空时平面分布

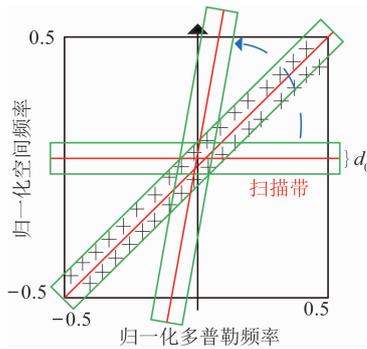
显然,总共存在2种情况:①不存在有源干扰时,谱值较大的原子都分布在杂波脊线附近;②存在有源干扰时,部分谱值较大原子集中分布在杂波脊线附近,其余则分布在有源干扰空间频率附近。

如图5所示,经过原点可确定多条直线,设直线斜率为 $k$ , $k_{\min}$ 取0, $k_{\max}$ 取较大的正数,从 $k_{\min}$ 到 $k_{\max}$ 每次递增量为 $\Delta k$ ,则 $k$ 取值集合为:

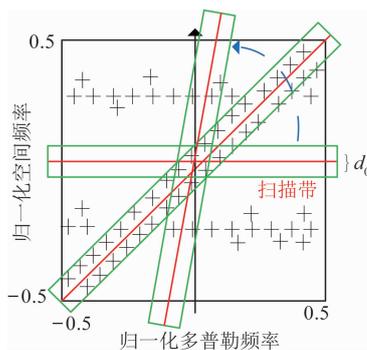
$$K = \{0, \Delta k, 2\Delta k, \dots, k_{\max}\} \quad (14)$$

则确定的多条直线集合可表示为:

$$S = \{f_s = kf_d \mid \forall k \in K\} \quad (15)$$



(a) 不存在有源干扰



(b) 存在有源干扰

图5 有源干扰检测原理图

将集合 $S$ 中每条直线进行扩展可确定多个带

状区域。当 $k$ 从 $K$ 中依次取值时,带状区域会在空时二维平面形成扫描效果。故为了描述方便,称带状区域为“扫描带”。直线 $f_s = kf_d$ 的扫描带为:

$$kf_d - b \leq f_s \leq kf_d + b \quad (16)$$

式中: $b$ 、 $-b$ 为扫描带2条边缘直线的截距。设每条扫描带的宽度都为 $d_0$ ,则 $b$ 与 $d_0$ 、 $k$ 的关系式为:

$$b = \frac{d_0}{2} \sqrt{1+k^2} \quad (17)$$

其中 $d_0$ 的大小决定了扫描带的宽度大小,一般 $d_0$ 取值较大,因为需要尽量保证在无有源干扰时能将谱值较大原子完全覆盖。

设某原子空时二维坐标为 $(f_{d0}, f_{s0})$ ,则该原子要进入扫描带则必须满足以下条件:

$$kf_{d0} - b \leq f_{s0} \leq kf_{d0} + b \quad (18)$$

前面通过正则化FOCUSS算法筛选出了谱值较大的原子,接下来就需要对这些原子进行判断。对于 $\forall k \in K$ ,都能确定1个扫描带,将进入扫描带的原子个数与总的原子个数比值设为 $P_e(k)$ ,则:

$$P_e(k) = N_{in}(k) / N_u \quad (19)$$

式中: $N_{in}(k)$ 为斜率是 $k$ 时进入对应扫描带的原子个数; $N_u$ 为总的原子个数。

显然, $P_e(k)$ 为关于斜率 $k$ 的离散函数, $P_e(k)$ 中总会存在一个最大值,将其用 $P_{e\max}$ 表示,则:

$$P_{e\max} = \max\{N_{in}(k) / N_u \mid \forall k \in K\} \quad (20)$$

存在干扰和不存在干扰时, $P_{e\max}$ 谱值较大点在空时二维平面的分布会有明显的区别。对于某个训练样本而言,如果稀疏恢复算法的精度够高,则当不存在有源干扰时, $P_{e\max}$ 的值会趋向于100%,且此时的扫描带位置会与杂波脊线接近。当存在有源干扰时, $P_{e\max}$ 会随着干扰的数量和功率变化,此时 $P_{e\max}$ 的值会相对较小。

因此,完全可以通过 $P_{e\max}$ 的大小精确判断出干扰存在与否,甚至还可以判断出干扰对整个训练样本的影响程度:

$$P_{e\max} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\leq}} P_0 \quad (21)$$

式中: $P_0$ 为判断是否存在有源干扰的门限值; $H_1$ 表示判为存在干扰, $H_0$ 表示判为不存在干扰。

当然,即便是不存在干扰的情况下,也可能出现个别点因稀疏算法恢复精度不够,导致个别点离杂波脊线较远,因此可以适当放宽判断的门限值,使得算法的判断结果具有稳健性。

### 3 仿真分析

本节通过仿真试验验证本文方法检测有源干扰

的有效性,仿真实验具体参数见表 1。

表 1 仿真参数

| 参数                          | 数值  | 参数        | 数值  |
|-----------------------------|-----|-----------|-----|
| 飞行速度/(m · s <sup>-1</sup> ) | 150 | 工作波长/m    | 0.4 |
| 发射阵元个数                      | 4   | 脉冲重复频率/Hz | 750 |
| 接收阵元个数                      | 8   | 杂噪比/dB    | 40  |
| CPI 内脉冲数                    | 8   | 杂波块数      | 361 |
| 发射阵元间距/m                    | 0.2 | $N_s$     | 48  |
| 接收阵元间距/m                    | 0.2 | $N_d$     | 48  |

总共考虑 6 个训练样本,其中部分训练样本存在有源干扰,每个有源干扰的干噪比都设置为 40 dB,具体的干扰参数设置见表 2。

表 2 干扰参数

| 训练样本 | 干扰个数 | 干扰归一化 $f_s$ |
|------|------|-------------|
| 1    | 0    |             |
| 2    | 1    | 0           |
| 3    | 0    |             |
| 4    | 2    | 0.1, -0.2   |
| 5    | 0    |             |
| 6    | 2    | 0.2, -0.1   |

### 3.1 空时功率谱比较

为了直观地观测训练样本在含有源干扰和不含源干扰时恢复出的空时功率谱的差异,选取训练样本 1 和训练样本 4 进行对比,具体结果见图 6。

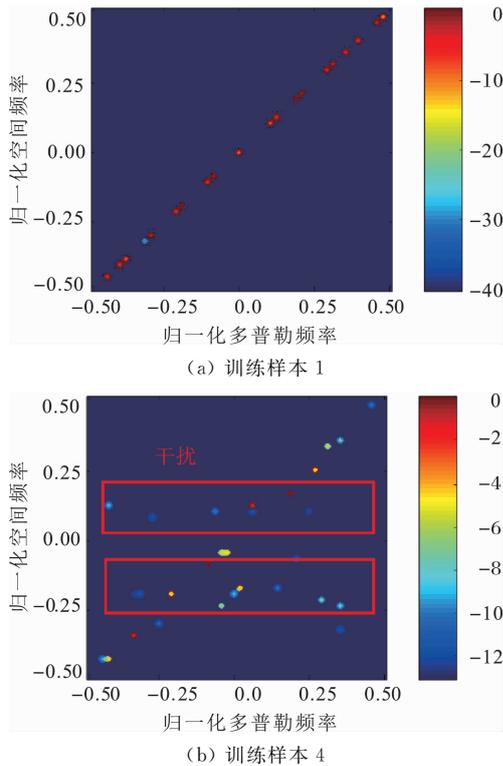


图 6 空时功率谱比较

显然,不存在和存在有源干扰时的空时功率谱在空时二维平面的分布差异很大,完全可以将谱值

较大原子的分布特征差异作为判断是否存在有源干扰的依据。

### 3.2 各训练样本干扰检测

进行干扰检测的具体参数设置如下:谱值门限取  $1 \times 10^{-2}$ ;扫描带参数  $k_{\min}$  取 0,  $\Delta k$  取 0.05,  $k_{\max}$  取 20,扫描带宽度  $d_0$  取 0.1;判定门限  $P_0$  取 90%。

表 3 为各训练样本经本文方法处理后得到的谱值较大点的相关数据。

表 3 谱值较大点相关数据

| 训练样本 | 扫描带最大点数 | 总点数 |
|------|---------|-----|
| 1    | 8       | 8   |
| 2    | 21      | 68  |
| 3    | 10      | 10  |
| 4    | 22      | 58  |
| 5    | 10      | 10  |
| 6    | 14      | 59  |

但是,不含有源干扰的训练样本得到的总点数一般较小,而含有源干扰的训练样本得到的总点数一般较大。表 3 中最重要的数据是进入扫描带的最大点数与总点数的比值大小,具体结果见图 7。

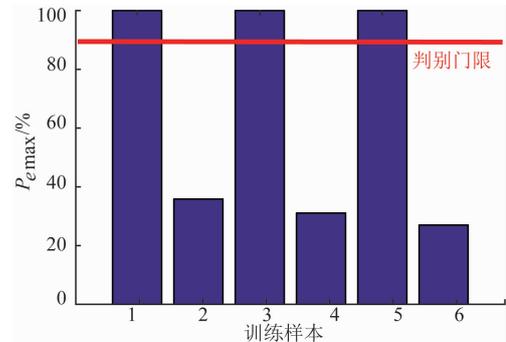


图 7 各训练样本的  $P_{e_{\max}}$  值

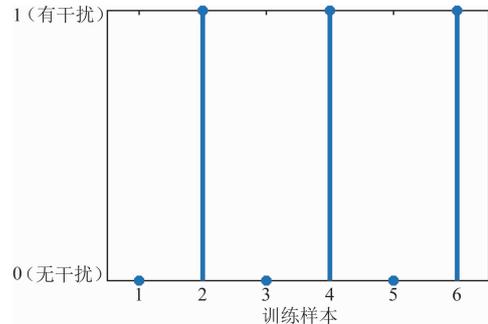


图 8 判定结果

由图 7 可以直观看出各训练样本  $P_{e_{\max}}$  值存在的差异。训练样本 1、3、5 进入扫描带的最大点数与总点数完全相等,  $P_{e_{\max}}$  值都为 100%。而训练样本 2、4、6 进入扫描带的最大点数只占总点数的一小部分,  $P_{e_{\max}}$  值处在 20% 到 40% 之间。结合判别门限,可以根据  $P_{e_{\max}}$  的大小清楚地判断出训练样本是否

存在干扰,具体判别结果见图8。

### 3.3 输出 SINR 比较

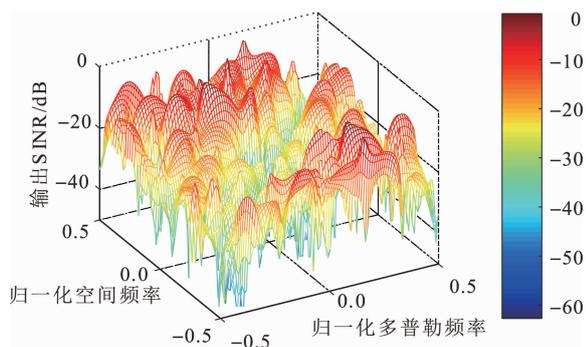
在使用稀疏算法恢复杂波谱前,可以先使用本文方法检测训练样本是否含有干扰,并将判为含干扰的训练样本剔除,然后再求解杂波谱。此项处理能够保证杂波抑制性能不受干扰影响,极大增强所恢复出的杂波谱的可靠性。

本文采用输出信干噪比(SINR)作为衡量杂波抑制性能的基准。SINR(无有源干扰时)定义为输出信号与输出杂波加噪声信号能量的比值:

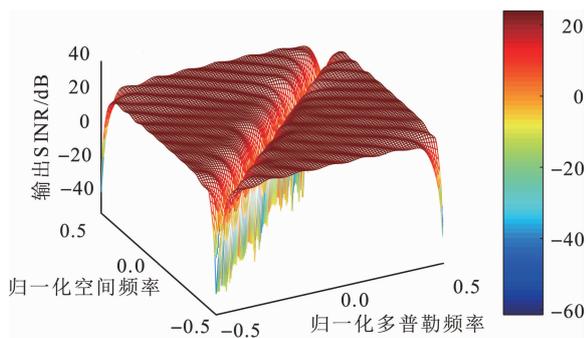
$$\text{SINR} = \frac{|\mathbf{w}^H \mathbf{v}_i|^2}{\mathbf{w}^H \mathbf{R} \mathbf{w}} \quad (22)$$

式中: $\mathbf{v}_i$ 为目标信号矢量; $\mathbf{R}$ 为杂波协方差矩阵与噪声协方差矩阵之和。

图9为使用正则化 FOCUSS 算法处理训练样本得到的输出 SINR 三维立体图。图9(a)为使用所有6个训练样本得到的输出 SINR 性能图,显然有源干扰对输出 SINR 性能影响非常大,分别存在于3个训练样本中的有源干扰使得杂波抑制性能严重下降,导致目标难以检测。图9(b)中只使用了检测为不含干扰的训练样本,其输出 SINR 性能远优于图9(a),使用本文方法选出的训练样本恢复杂波谱能够保证杂波抑制性能不受干扰影响。



(a) 训练样本未经本文方法挑选



(b) 训练样本已经本文方法挑选

图9 输出 SINR 立体图

## 4 结语

本文提出了一种基于稀疏恢复的 MIMO-STAP 干扰样本检测方法。该方法使用正则化 FOCUSS 算法处理训练样本得到空时功率谱值,因为存在和不存在干扰时谱值较大的原子在空时二维平面分布的几何差异很大,本文利用了这种差异实现了对有源干扰的检测。仿真结果表明,该方法可有效检测训练样本是否存在干扰,使用该方法挑选出的无干扰训练样本恢复杂波谱,可保证空时滤波器的杂波抑制性能,提升稀疏算法求解杂波谱时涉及到的训练样本的可靠性。

### 参考文献 References:

- [1] KLEMM R. Introduction to Space-Time Adaptive Processing[J]. Electronics & Communications Engineering Journal, 1999, 11(1):5-12.
- [2] REED I S, MALLET J D, BRENNAN L E. Rapid Convergence Rate in Adaptive Arrays[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1974 (6): 853-863.
- [3] KLEMM R. Space-Time Adaptive Processing: Principles and Applications [Book Review][J]. Electronics & Communications Engineering Journal, 1998, 11(4):172-172.
- [4] 马汇森, 马林华, 甘元, 等. STAP 技术在有源干扰环境下的运用方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2012, 13(3):65-69.  
MA H M, MA L H, GAN Y, et al. A Method of STAP Application in Active Jamming Environment [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2012, 13(3):65-69. (in Chinese)
- [5] LI H, BAO W, HU J, et al. A Training Samples Selection Method Based on System Identification for STAP [J]. Signal Processing, 2017, 142: S016 5168417302542.
- [6] WANG Q, ZHANG Y, LIU H, et al. Interference Detecting Method for Space-Time Two-Dimension Based on Matrix Similarity[J]. Systems Engineering & Electronics, 2017, 39(2):259-262.
- [7] LIU H W, ZHANG Y S, WANG Q, et al. Training Sample Selection for Airborne Radar Algorithm Based on Sparse Reconstruction[J]. Systems Engi-

- neering & Electronics, 2016, 7(38):1533-1537.
- [8] 李志汇, 张永顺, 刘汉伟, 等. 基于先验信息稀疏恢复的非均匀样本检测方法[J]. 兵工学报, 2018, 39(2):331-337.
- LI Z H, ZHANG Y S, LIU H W, et al. Non-Homogeneous Training Sample Detection Method Based on Sparse Recovery with Prior Information [J]. Journal of Military Engineering, 2018, 39(2):331-337. (in Chinese)
- [9] HAN S, FAN C, HUANG X. A Novel Training Sample Selection Method for STAP Based on Clutter Sparse Recovery[C]// Progress in Electromagnetic Research Symposium, 2016.
- [10] DUAN K, WANG Z, XIE W, et al. Sparsity-Based STAP Algorithm with Multiple Measurement Vectors via Sparse Bayesian Learning Strategy for Airborne Aadar[J]. IET Signal Processing, 2017, 11(5):544-553.
- [11] 李志汇, 张永顺, 高乾, 等. 基于局部搜索 OMP 的网格失配 STAP 算法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(6): 1221-1226.
- LI Z H, ZHANG Y S, GAO G, et al. Off-grid STAP Algorithm Based on Local Search Orthogonal Matching Pursuit [J]. Systems Engineering & Electronics, 2018, 40(6): 1221-1226. (in Chinese)
- [12] TANG B, LI J, ZHANG Y, et al. Design of MIMO Radar Waveform Covariance Matrix for Clutter and Jamming Suppression Based on Space Time Adaptive Processing [J]. Signal Processing, 2016, 121: 60-69.
- [13] TANG B, TANG J. JOINT Design of Transmit Waveforms and Receive Filters for MIMO Radar Space-time Adaptive Processing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(18): 4707-4722.
- [14] 王泽涛, 段克清, 谢文冲, 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 Z T, DUAN K Q, XIE W C, et al. A Joint Sparse Recovery STAP Method Based on SA-MUSIC [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(5): 846-853. (in Chinese)
- [15] 王珽. 机载 MIMO 雷达空时自适应处理模型与算法研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2017.
- WANG T. Research on Models and Algorithms of Airborne Multiple-Input Multiple-Output Radar Space-Time Adaptive Processing. [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2017. (in Chinese)
- [16] 阳召成, 黎湘, 王宏强. 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):1194-1204.
- YANG Z C, LI X, WANG H Q. An Overview of Space-Time Adaptive Processing Technology Based on Sparsity of Space-Time Power Spectrum [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(6): 1194-1204. (in Chinese)
- [17] RAO B D, ENGAN K, COTTER S F, et al. Subset Selection in Noise Based on Diversity Measure Minimization[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(3):760-770.

(编辑:徐敏)