

# 基于杂波距离方位谱的机载非正侧 MIMO 雷达 STAP 方法

冯为可, 张永顺, 于伟洋

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

**摘要** 在机载非正侧 MIMO 雷达系统中,传统统计类空时自适应处理方法难以获得足量的独立同分布训练单元,无法准确估计待测单元杂波特性,杂波抑制性能严重下降。为了减少所需训练单元数,在分析机载非正侧 MIMO 雷达杂波在距离-方位域上分布的基础上,给出了杂波距离方位谱的概念;然后,利用稀疏恢复方法和距离滤波器估计杂波距离方位谱;根据杂波距离方位谱估计杂波协方差矩阵、构造空时滤波器,滤除杂波、检测目标。由于利用了雷达和载机参数等飞行配置先验信息以及杂波空时耦合关系构造,基于杂波距离方位谱的 STAP 方法可以在少量训练单元的情况下准确估计杂波协方差矩阵,有效抑制杂波、检测慢速目标,仿真实验证明了方法的有效性。

**关键词** 机载非正侧 MIMO 雷达;杂波抑制;空时自适应处理

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.04.008

**中图分类号** V243.2;TN959 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)04-0041-05

## A Novel STAP Method Based on Clutter Range Azimuth Spectrum for Non-side Looking Airborne MIMO Radar System

FENG Weike, ZHANG Yongshun, YU Weiyang

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** In airborne non-side looking MIMO radar system, conventional statistical-based space-time adaptive processing (STAP) algorithms always cannot obtain enough independent identically distributed training data, and fail to estimate the clutter covariance accurately, thus degrading the performance of clutter suppression. In order to reduce the requirement of training data, the concept of clutter range azimuth spectrum (RA) is first presented. Then, the clutter RA is obtained by utilizing a sparse recovery algorithm and a pre-constructed range filter. At last, the covariance matrix of clutter is calculated by the estimated clutter RA. Due to the application of the priori information and the relation between the spatial frequency and temporal frequency of clutter, the proposed STAP method based on RA, i.e. RA-STAP, can estimate the covariance matrix of clutter with a few training cells accurately. Therefore, the method can suppress the clutter and detect low-moving target effectively. The theoretical analysis and the experimental simulations demonstrate that the method is effective.

**收稿日期:** 2015-07-20

**基金项目:** 航空科学基金(2012JQ8019)

**作者简介:** 冯为可(1992-),男,河南平顶山人,博士生,主要从事机载雷达研究.E-mail:fenghard007@163.com

**引用格式:** 冯为可,张永顺,于伟洋,等.基于杂波距离方位谱的机载非正侧 MIMO 雷达 STAP 方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(4):41-45. FENG Weike, ZHANG Yongshun, YU Weiyang. A Novel STAP Method Based on Clutter Range Azimuth Spectrum for Non-side Looking Airborne MIMO Radar System[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(4): 41-45.

**Key words:** airborne non-side looking MIMO radar; clutter suppression; STAP

空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)<sup>[1]</sup>是机载雷达抑制杂波、检测地面慢速运动目标的关键技术,目前在机载相控阵雷达系统中的应用已趋于成熟。机载多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)雷达<sup>[2]</sup>通过发射接收多个正交波形或非相干信号增大系统自由度,在角度分辨率、参数估计精度和杂波抑制等方面具有巨大的潜力,因此,将机载相控阵雷达 STAP 方法推广到 MIMO 雷达系统中检测动目标成为近几年研究的热点<sup>[3-4]</sup>。

STAP 的性能是由杂波协方差矩阵估计的准确性决定的,在实际应用中,待测单元的杂波协方差矩阵是利用训练单元估计得到的。在机载非正侧阵雷达和双(多)基雷达系统中,杂波具有距离依赖性,同时实际杂波环境具有一定非均匀性,杂波不满足独立同分布条件,无法以训练单元准确估计待测单元的杂波协方差矩阵,构造的空时滤波器杂波抑制性能下降。由于 MIMO 雷达发射波形分集使得空时维数相对相控阵雷达大幅提高, MIMO-STAP 方法涉及的运算量和需要的独立同分布训练单元数也大大增加,如何减少运算量以及利用较少训练单元准确估计杂波分布特性,是 MIMO-STAP 方法亟待解决的问题。文献[5]在相控阵体制下提出了杂波空时谱稀疏恢复的空时自适应处理(STAP Algorithm Using Sparse Recovery, SR-STAP)方法,只需少量训练单元即可实现高分辨杂波空时谱和相应杂波协方差矩阵的估计,但现有基于杂波空时谱稀疏恢复的空时自适应处理方法<sup>[5-9]</sup>并没有充分利用先验信息,性能还有待进一步提高。

## 1 机载 MIMO 雷达杂波模型

假设载机以速度  $V$  匀速直线运动,天线阵面与载机速度夹角为  $\theta_p$ ,载机高为  $H$ ;天线发射和接收阵列均为等距线阵,阵元数为  $M$  和  $N$ ,阵间距分别为  $d_T$  和  $d_R$ ,收发间距比  $\alpha = d_T/d_R$ ;1 个相干脉冲间隔内的脉冲数为  $K$ ,发射脉冲为正交相位编码,且相干脉冲间隔内载机移动的距离远小于雷达与杂波间斜距,即雷达与杂波几何关系近似不变。

在分析杂波回波时,一般认为第  $l$  个距离单元的杂波是由该距离单元上多个离散杂波块的回波叠加而成,其中,第  $i$  个离散杂波块的归一化多普勒频率和空间频率为:

$$\begin{cases} f_{d,i} = (2V/\lambda f_{prf}) \cos\varphi_l \cos(\theta_i - \theta_p) \\ f_{s,i} = \cos\varphi_l \cos\theta_i d_R/\lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\theta_i$ 、 $\varphi_l = \arcsin(H/R_l)$  和  $R_l$  分别为第  $l$  个距

离单元第  $i$  个离散杂波块对应的方位角、俯仰角和斜距;  $f_{prf}$  和  $\lambda$  分别为脉冲重复频率和波长。

假设各离散杂波块之间相互独立,则经过匹配滤波,雷达杂波回波数据可表示为:

$$\mathbf{x}_l = \sum_{i=1}^{N_c} \sigma_i \mathbf{S}(\omega_{t,i}, \omega_{s,i}) \in C^{MNK \times 1} \quad (2)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, N_c$ ,  $N_c$  为距离单元内离散杂波块个数;  $\sigma_i$  为第  $i$  个杂波块的复幅度;  $\mathbf{S}(\omega_{t,i}, \omega_{s,i}) = \mathbf{S}_T(\omega_{t,i}) \otimes \mathbf{S}_{S_r}(\omega_{s,i}) \otimes \mathbf{S}_{S_r}(\omega_{s,i})$  为杂波的发射-接收-时域三维空时导向矢量;  $\mathbf{S}_{S_r}(\omega_{s,i})$ 、 $\mathbf{S}_{S_r}(\omega_{s,i})$ 、 $\mathbf{S}_T(\omega_{t,i})$  分别为对应的发射、接收及时域导向矢量:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{S_r}(\omega_{s,i}) = [1, \dots, \exp(j\omega_{s,i}a(M-1))]^T \in C^{M \times 1} \\ \mathbf{S}_{S_r}(\omega_{s,i}) = [1, \dots, \exp(j\omega_{s,i}(N-1))]^T \in C^{N \times 1} \\ \mathbf{S}_T(\omega_{t,i}) = [1, \dots, \exp(j\omega_{t,i}(K-1))]^T \in C^{K \times 1} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\omega_{s,i} = 2\pi f_{s,i}$  和  $\omega_{t,i} = 2\pi f_{d,i}$  分别为空域角频率和时域角频率。

因此,第  $l$  个距离单元的杂波协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_{xx,l} = E[\mathbf{x}_l \mathbf{x}_l^H] = \sum_{i=1}^{N_c} \sigma_i^2 \mathbf{S}(\omega_{t,i}, \omega_{s,i}) \mathbf{S}^H(\omega_{t,i}, \omega_{s,i}) \quad (4)$$

实际中,待测单元的杂波协方差矩阵是未知的,传统统计类 STAP 方法需要足够的满足独立同分布平稳训练单元获得对杂波协方差矩阵的估计:

$$\hat{\mathbf{R}}_{xx,0} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \mathbf{x}_i \mathbf{x}_i^H \quad (5)$$

式中:  $\hat{\mathbf{R}}_{xx,0}$  为待测单元的杂波协方差估计;  $L$  为训练单元数;  $\mathbf{x}_i$  为训练单元回波数据。

为使信杂噪比损失小于 3 dB,训练单元数应满足  $L \geq 2MNK$ <sup>[3]</sup>,在大天线情况下,雷达的阵元数  $M$ 、 $N$  和相干脉冲数  $K$  是较大的,且非正侧阵雷达杂波存在距离相关性,实际环境具有一定程度的非均匀性,所以,统计类 STAP 方法往往很难得到足量的平稳训练单元来准确估计待检测距离单元的杂波分布特性。基于杂波谱稀疏恢复的 STAP 方法能够在少量训练单元数的情况下,实现对杂波协方差矩阵的有效估计,但 SR-STAP 方法只在估计杂波自由度时利用先验信息<sup>[5]</sup>,构造的超完备基矩阵并没有利用杂波固有空时耦合关系、雷达和载机参数等先验信息,杂波空时谱估计准确性有待提高。

## 2 基于距离方位谱的 STAP 方法

实际中,雷达和载机的参数是已知的或可计算得到的,杂波多普勒频率和空间频率又是由杂波的距离和方位角决定的,基于此,本文提出了基于杂波距离方位谱的 STAP 方法。

首先,对于特定距离单元,杂波俯仰角是已知的,杂波多普勒频率和空域频率仅取决于方位角,因此,杂波回波数据的矩阵形式为:

$$\mathbf{x}_l = \sum_{i=1}^{N_c} \sigma_i \mathbf{S}(\omega_{l,i}, \varphi_{s,i}) = \mathbf{\Psi}(R_l, \theta) \boldsymbol{\alpha}_l \quad (6)$$

式中:  $\boldsymbol{\alpha}_l = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{N_c}]^T \in C^{N_c \times 1}$  表示第  $l$  个距离单元杂波在不同方位角上的复幅度;  $\mathbf{\Psi}(R_l, \theta_i)$  为空时导向矢量矩阵:

$$\mathbf{\Psi}(R_l, \theta) = [\mathbf{S}(R_l, \theta_1), \dots, \mathbf{S}(R_l, \theta_{N_c})] \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{S}(R_l, \theta_i)$  为第  $l$  个距离单元第  $i$  个方位角的杂波空时导向矢量,其对应的  $\omega_{l,i}$  和  $\omega_{s,i}$  分别为:

$$\begin{cases} \omega_{l,i} = \frac{4\pi V \sqrt{R_l^2 - H^2} \cos(\theta_i - \theta_p)}{\lambda f_{\text{prt}} R_l} \\ \omega_{s,i} = \frac{2\pi d_R \sqrt{R_l^2 - H^2} \cos\theta_i}{\lambda R_l} \end{cases} \quad (8)$$

由于  $N_c > MNK$ , 方程(6)为欠定方程,求解为 NP 难问题。为了准确求解方程(6),本文对杂波空时导向矢量矩阵进行拓展,将单个距离单元杂波在方位角一维上的分布延伸到距离-方位角二维分布,提出了距离方位谱的概念,并利用稀疏恢复和一个距离滤波器提出一种新的 STAP 方法。

不考虑雷达在一个时刻处理的是一个特定距离单元的数据这个事实,假设雷达可以同时接收并处理所有距离单元的杂波数据,则雷达回波数据由所有距离-方位上的杂波组成,表示为:

$$\mathbf{x} = \sum_l \mathbf{x}_l = \sum_l \sum_{i=1}^{N_c} \sigma_i \mathbf{S}(\omega_{l,i}, \varphi_{s,i}) = \mathbf{\Psi}(R, \theta) \boldsymbol{\alpha} \quad (9)$$

式中:  $\boldsymbol{\alpha}$  为杂波在距离-方位角域上的幅度分布,我们把  $\boldsymbol{\alpha}$  定义为杂波距离方位谱(Clutter Range Azimuth Spectrum, RA),  $\mathbf{\Psi}(R, \theta)$  为杂波在所有距离-方位域上的空时导向矢量矩阵,表示为:

$$\mathbf{\Psi}(R, \theta) = [\mathbf{\Psi}(R_1, \theta), \dots, \mathbf{\Psi}(R_l, \theta), \dots] \quad (10)$$

假设不同距离-方位点  $(R_1, \theta_1)$  和  $(R_2, \theta_2)$  对应的多普勒频率和空间频率均相同,即满足下式:

$$\begin{cases} \cos\varphi_1 \cos(\theta_1 - \theta_p) = \cos\varphi_2 \cos(\theta_2 - \theta_p) \\ \cos\varphi_1 \cos\theta_1 = \cos\varphi_2 \cos\theta_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\varphi_1 = \text{asin}(H/R_1)$ 、 $\varphi_2 = \text{asin}(H/R_2)$  均属于  $[0, \pi/2]$ ,  $\theta_1, \theta_2$  均属于  $[0, \pi]$ 。

对于机载非正侧雷达,  $\theta_p \neq 0$ , 仅有  $\varphi_1 = \varphi_2$  和  $\theta_1 = \theta_2$  均成立时,式(11)才成立,即不同距离、方位角对应的多普勒频率和空间频率不同,杂波多普勒频率-空间频率和距离-方位角之间存在一一对应关系,因此,在机载非正侧阵雷达系统中,杂波在距离方位域上的分布具有唯一性。可以这么理解,杂波距离方位谱在每一个距离单元上的分布对应着杂波空时谱上的一个“环”(即杂波分布曲线),杂波距离方位谱同样具有时间维和空间维,与杂波空时谱在实质上是等效的,仅是杂波在不同域上的表现形式。

将式(6)中的空时导向矢量矩阵替换为  $\mathbf{\Psi}(R, \theta)$ , 表示为:

$$\mathbf{x}_l = \mathbf{\Psi}(R, \theta) \boldsymbol{\alpha}_l \quad (12)$$

由于  $\mathbf{x}_l$  为特定距离单元的数据,此时  $\boldsymbol{\alpha}_l$  具有稀疏性,因此式 12 可以由稀疏恢复方法准确求解。

下面给出本文 RA-STAP 方法。

## 2.1 遍历并离散距离和方位角

根据雷达天线波束范围得到的杂波方位角范围为  $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ , 确定距离范围为  $[R_{\min}, R_{\max}]$ , 将距离和方位角分别遍历并离散为  $N_R$  和  $N_\theta$  个分辨单元 ( $N_R N_\theta \gg MNK$ ), 则第  $m$  个距离  $R_m$ 、第  $n$  个方位角的值分别为:

$$R_m = R_{\min} + \frac{(m-1)(R_{\max} - R_{\min})}{(N_R - 1)} \quad (13)$$

$$\theta_n = \theta_{\min} + \frac{(n-1)(\theta_{\max} - \theta_{\min})}{N_\theta - 1} \quad (14)$$

式中:  $m = 1, 2, \dots, N_R$ ;  $n = 1, 2, \dots, N_\theta$ 。

距离范围  $[R_{\min}, R_{\max}]$  的确定应使距离范围划分后的某个距离分辨单元满足  $R_m = R_l$ , 其中  $R_l$  表示待测距离单元的斜距,此时可以设置距离范围为:

$$R_{\min} = R_l - AR_{\text{cell}}; R_{\max} = R_l + BR_{\text{cell}} \quad (15)$$

式中:  $A, B$  为满足  $A+B=(N_R-1)$  的整数,  $R_{\text{cell}}$  为扩展距离,此时  $R_{A+1} = R_l$ 。

## 2.2 构造杂波空时导向矢量矩阵

根据式(8)计算的时域角频率和空域角频率为:

$$\begin{cases} \omega_{l,m,n} = \frac{4\pi V \sqrt{R_m^2 - H^2} \cos(\theta_n - \theta_p)}{\lambda f_{\text{prt}} R_m} \\ \omega_{s,m,n} = \frac{2\pi d_R \sqrt{R_m^2 - H^2} \cos\theta_n}{\lambda R_m} \end{cases} \quad (16)$$

由式(10)计算空时导向矩阵  $\mathbf{\Psi}(R, \theta)$  为:

$$\mathbf{\Psi}(R, \theta) = [\mathbf{S}(R_1, \theta_1), \dots, \mathbf{S}(R_m, \theta_n), \dots, \mathbf{S}(R_{N_R}, \theta_{N_\theta})] \quad (17)$$

式中:  $\mathbf{S}(R_m, \theta_n)$  为第  $m$  个距离  $R_m$ 、第  $n$  个方位角对应的杂波空时导向矢量。

## 2.3 利用稀疏恢复求解方程估计初始杂波距离方位谱

将第  $l$  个距离单元的杂波回波数据表示为:

$$\mathbf{X}_l = \mathbf{\Psi}(R, \theta) \hat{\boldsymbol{\alpha}}_l \quad (18)$$

由于杂波在距离-方位域上分布的唯一性,  $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_l$  的稀疏度取决于  $N_R$ , 即  $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_l$  仅有约  $1/N_R$  的分量为显著值,其余为接近于零的非显著量,因此当选择  $N_R$  使得  $\hat{\boldsymbol{\alpha}}_l$  满足稀疏性时,利用稀疏恢复理论将式 18 转换为约束最优化问题求解:

$$\min \|\hat{\boldsymbol{\alpha}}_l\|_0, \text{ s.t. } \|\mathbf{x} - \mathbf{\Psi}(R, \theta) \hat{\boldsymbol{\alpha}}_l\|_2 \leq \varepsilon \quad (19)$$

式中:  $\|\cdot\|_p$  表示矩阵或者向量的  $p$  范数;  $\varepsilon$  为噪声决定。

求解式(19)的方法主要有 3 种,即  $l_1$  凸优化方法<sup>[9]</sup>、FOCUSS 算法<sup>[10]</sup>和贪婪类算法<sup>[11]</sup>等,综合运



算量和性能,本文利用 FOCUSS 方法进行求解。

由于临近单元杂波分布特性近似相同,因此为了补偿稀疏恢复求解后出现的过稀疏现象,进一步提高待测单元空时谱估计的准确性,本文将待测单元最邻近的 4 个训练单元作为保护单元,在待测单元两侧对称选取  $2D$  个训练单元进行平均处理估计待测单元的距离方位谱。设  $\hat{\alpha}_l$  ( $l = 1, 2, \dots, 2D$ ) 为训练单元杂波距离方位谱估计,则平均后可得待测单元杂波的距离方位谱为:

$$\hat{\alpha}_0 = \sum_{l=1}^{2D} \hat{\alpha}_l / 2D \quad (20)$$

#### 2.4 利用距离滤波器得到准确杂波距离方位谱

理想情况下,杂波沿着杂波分布曲线分布,而在稀疏恢复类 STAP 方法中,得到的杂波空时谱会出现在杂波分布曲线外的值,称为“伪值”,由本文方法得到的杂波距离方位谱中,同样存在待测距离单元外的伪值。为减少稀疏恢复计算过程产生的伪值,准确估计杂波分布特性,本文根据不同距离单元杂波斜距的不同设计距离滤波器消除伪值。

与杂波空时谱  $\hat{\alpha}_0$  相对应,设待测距离单元的距离滤波器为  $N_R N_\theta$  维列向量  $\mathbf{F}_0$ ,其元素  $\mathbf{F}_{0,q}$  代表第  $q = [(m-1)N_\theta + n]$  个杂波距离方位谱分量  $\hat{\alpha}_{0,q}$  对应的权值:

$$\mathbf{F}_{0,q} = 1, R_m \in \Omega(R_0); \mathbf{F}_{0,q} = 0, R_m \notin \Omega(R_0) \quad (21)$$

式中:  $\Omega(R_0)$  为待测距离单元斜距范围,可根据下式确定:

$$\Omega(R_0) = [R_0 - \eta R_{\text{cell}}, R_0 + \eta R_{\text{cell}}] \quad (22)$$

式中:  $\eta$  为距离滤波器系数,由系统精度要求决定。

滤除伪值的过程可以表示为:

$$\hat{\alpha}_0^+ = \mathbf{F}_0 \odot \hat{\alpha}_0 \quad (23)$$

式中:  $\odot$  表示 Hadamard 积;  $\hat{\alpha}_0^+$  为滤除伪值后的杂波距离方位谱。

#### 2.5 估计杂波协方差矩阵,构造杂波空时滤波器

获得雷达杂波距离方位谱  $\hat{\alpha}_0^+$  后,待测距离单元杂波协方差矩阵可通过下式估计:

$$\hat{\mathbf{R}}_{xx,0} = \sum_{m=1}^{N_R} \sum_{n=1}^{N_\theta} |\hat{\alpha}_{0,m,n}^+|^2 \mathbf{S}(R_m, \theta_n) \mathbf{S}(R_m, \theta_n)^H + \beta \mathbf{I} \quad (24)$$

式中:  $\hat{\alpha}_{0,m,n}^+$  为距离方位谱  $\hat{\alpha}_0^+$  在第  $m$  个距离和第  $n$  个方位角上的分量;  $\beta$  为常数对角线加载量,根据实测的噪声电平确定。

得到杂波协方差矩阵估计后,可得杂波空时滤波器最优权值为:

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{v} \hat{\mathbf{R}}_{xx,0}^{-1} \mathbf{S}_0 \quad (26)$$

式中:  $\mathbf{v} = 1/\mathbf{S}_0^H \hat{\mathbf{R}}_{xx,0}^{-1} \mathbf{S}_0$  为归一化常数;  $\mathbf{S}_0$  为目标空时导向矢量。

本文 RA-STAP 方法与现有 SR-STAP 方法相

比具有 2 个主要的特点:一是利用了杂波空时耦合关系以及杂波斜距、方位角范围、载机速度等雷达和载机参数先验信息构造空时导向矩阵,与实际杂波分布更加匹配;二是能够在距离和方位角上有更多的选择性,可以通过距离滤波器处理有效减少稀疏恢复求解过程中产生的伪值。

### 3 仿真实验

选取斜侧阵 ( $\theta_p = 30^\circ$ ) 机载 MIMO 雷达进行仿真实验,实验条件为:发射、接收阵元数和相干脉冲间隔内的脉冲数均为 8;发射阵元间隔为 1.15 m,接收阵元间隔为 0.115 m,载机高度为 6 km,载机速度 140 m/s,波长 0.23 m,脉冲重复频率 2 434.8 Hz;杂噪比 60 dB,雷达最大作用距离 200 km,方位角范围  $[0, \pi]$ ;第 151 个距离单元为待测单元,斜距为 31.5 km。本文算法参数设置为:距离和方位角离散程度分别为  $N_R = 23$ 、 $N_\theta = 180$ ,  $R_{\text{cell}} = 2 000$  m,距离范围设置为  $[25.5 \text{ km}, 69.5 \text{ km}]$ ,距离滤波器系数  $\eta = 1$ ,训练样本数  $2D = 6$ 。

#### 3.1 实验 1:杂波特性估计性能

图 1 给出了利用本文方法构造的距离滤波器处理前的杂波距离方位谱及滤波器处理前后对应的 MV 杂波谱。

可以看出,经过距离滤波器处理后,本文方法可以基于杂波距离方位谱得到杂波分布特性的高分辨估计。这说明本文方法仅需 6 个训练单元即可获得杂波特性的高性能估计,相比  $2MNK = 1024$  大大减少,说明本文方法具有较好的杂波协方差矩阵估计收敛性能。

#### 3.2 实验 2:杂波抑制性能

假设待测距离单元内存在归一化多普勒频率和空间频率分别为 0.35 和 0.2 的运动目标,信噪比为 20 dB。以距离向输出为基准衡量分析本文方法的杂波抑制性能,距离向输出定义为雷达回波数据在目标多普勒频率和空间频率通道沿距离向的输出。图 2 给出了无杂波抑制、经过本文方法抑制杂波后雷达回波数据在目标空时通道的输出,其中,无杂波抑制处理的输出可以理解为权值为  $\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{S}_0 / \|\mathbf{S}_0\|_2$  的杂波空时滤波器抑制杂波后的输出。

由图 2 可以看出,未进行杂波抑制时,处在第 151 个距离单元的目标完全被其他距离单元杂波所淹没,无法检测。而本文方法利用 6 个训练样本即可以有效抑制杂波,使得目标所在距离单元的输出高出无目标距离单元最大的输出 24.68 dB,因此,本文方法能够有效检测地面动目标。

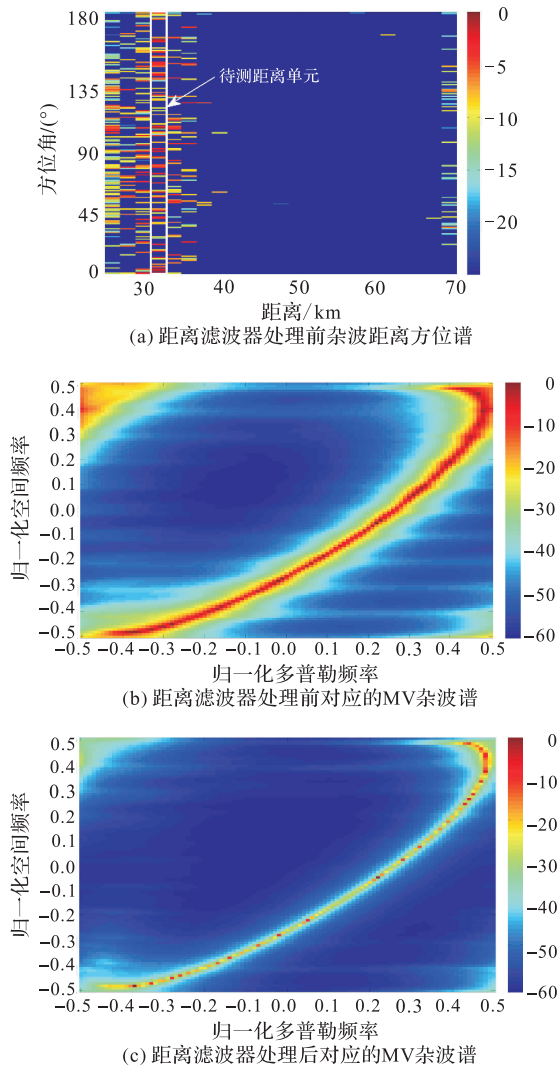


图 1 距离滤波器处理前后 MV 杂波谱对比

Fig.1 The comparison between MV clutter spectrum before and after a pre-constructed range filter

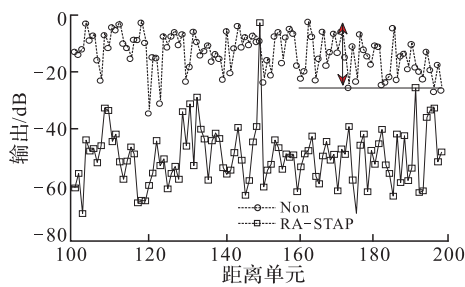


图 2 距离向输出

Fig.2 The output in the range

### 4 结语

本文在分析机载非正侧阵 MIMO 雷达杂波分布特性的基础上,提出了杂波距离方位谱的概念,并结合稀疏恢复和距离滤波器将其应用到杂波协方差矩阵估计之中。由于利用了先验的雷达信息和杂波空时耦合关系,本文方法利用少量训练单元即可获

得较为准确的杂波协方差矩阵,因此构造的杂波空时滤波器能够有效滤除杂波、检测慢速动目标。本文方法敏感于参数的设置、运算量大,如何合理设置参数值、减少运算量值得下一步研究。

### 参考文献(References):

[1] KLEMM R. Principles of Space-Time Adaptive Processing [M].London: Institute of Electrical Engineering, 2006.

[2] BOIZARD M, BRIGUI F, GINOLHAC G, et al. Multidimensional Low-rank Filter Based on the AU-HOSVD for MIMO STAP[C]//2013 IEEE 5th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), IEEE, 2013:412-415.

[3] LEE K, SO H, SONG K. Performance Analysis of Pseudo range Error in STAP Beamforming Algorithm for Array Antenna [J].Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 2014,3(2):37-44.

[4] 冯为可, 张永顺, 赵杰. 机载 MIMO 雷达修正 GMB 降维方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(1): 28-31. FENG Weike, ZHANG Yongshun, ZHAO Jie. A Modified Generalized Adjacent Multiple-Beam Approach for STAP of Airborne MIMO radar [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(1): 28-31.(in Chinese)

[5] SUN K, ZHANG H, LI G, et al. A Novel STAP Algorithm using Sparse Recovery Technique [C]//IEEE International Conference on Geoscience & Remote Sensing Symposium. Cape Town:IEEE,2009: 336-339.

[6] MA Z, LIU Y, MENG H, et al. Jointly Sparse Recovery of Multiple Snapshots in STAP [C]//IEEE Radar Conference. Ottawa, Ontario: IEEE,2013.

[7] YANG Z, LI X, WANG H, et al. Adaptive Clutter Suppression Based on Iterative Adaptive Approach for Airborne Radar[J]. Signal Processing, 2013, 93(2): 3567-3577.

[8] 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 Zhaocheng, LI Xiang, WANG Hongqiang. 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)

[9] YANG Z C, DE LAMARE R C, LI X. L1-Regularized STAP Algorithms with A Generalized Side-lobe Canceler Architecture for Airborne Radar[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(2): 674-686.

[10] HE Zhaoshui, CICHOCKI Andrzej, ZDUNEK Rafal, et al. Improved FOCUSS Method with Conjugate Gradient Iterations [J].IEEE Trans on SP, 2009, 57 (1):399 - 404.

[11] TROPP J A, GILBERT A C. Signal Recovery from Random Measurements via Orthogonal Matching Pursuit [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(12): 4655-4666.

(编辑:姚树峰)