

# 基于降维稀疏重构的高效数据域 STAP 算法研究

沈明威<sup>1</sup>, 王 杰<sup>1</sup>, 吴 迪<sup>2</sup>, 朱岱寅<sup>2</sup>

(1. 河海大学计算机与信息学院, 江苏南京 211100; 2. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏南京 210016)

**摘 要:** 本文基于信号稀疏重构技术, 研究利用待检测样本直接进行动目标检测的高效空时自适应处理 (STAP) 方案. 该方案对时域降维的阵元-多普勒域数据采用空域稀疏重构技术估计高分辨率角度-多普勒谱, 进而基于稀疏空时谱研究知识辅助的动目标检测算法. 理论分析和仿真实验结果表明: 本文算法能有效抑制杂波实现慢动目标检测, 且运算量小易于实时并行处理.

**关键词:** 空时自适应处理; 稀疏重构; 杂波抑制

**中图分类号:** TN958.92

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2014)11-2286-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.11.024

## An Efficient Data Domain STAP Algorithm Based on Reduced-Dimension Sparse Reconstruction

SHEN Ming-wei<sup>1</sup>, WANG Jie<sup>1</sup>, WU Di<sup>2</sup>, ZHU Dai-yin<sup>2</sup>

(1. College of Computer & Information Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China;

2. College of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu, 210016, China)

**Abstract:** An efficient direct data domain STAP scheme based on a sparse reconstruction of the primary data is presented to effectively detect ground moving targets. To reduce the computational complexity, the proposed method obtains the high resolution angle-Doppler spectrum by finding the sparsest coefficients using the reduced-dimension data in element-Doppler domain. Therefore, based on the distinct image features of clutter and targets signals, a knowledge-aided moving targets detection algorithm is also introduced. The effectiveness of the proposed approach is shown by both theoretical analysis and simulation results. This scheme is computationally efficient for real-time parallel processing.

**Key words:** space-time adaptive processing; sparse reconstruction; clutter suppression

## 1 引言

机载雷达下视工作, 地海杂波频谱宽、强度大, 因此对杂波进行有效抑制是提高雷达探测性能的重要手段. 空时自适应处理 (STAP) 在二维平面联合设计自适应滤波器, 能有效抑制杂波和有源干扰, 是新一代预警机雷达的核心技术. 但 STAP 作为一种统计自适应处理方法, 其性能只有在杂波满足独立同分布 (IID) 条件下才能充分发挥<sup>[1-3]</sup>.

机载雷达实际工作环境受地形起伏、阵面构型等多种因素影响, 其杂波分布必然呈现非均匀特性. 非均匀检测 (NHD)、杂波谱补偿等方法改善杂波非均匀特性的有效手段, 但增加的处理流程加剧了 STAP 算法复杂度, 进而限制了 STAP 的工程应用<sup>[3]</sup>. T Sarkar 以孤立干

扰滤除为核心概念, 提出了仅用待检测单元为样本滤除其中干扰和杂波的直接数据域方案 (DDD), 其性能在系统误差下会有下降<sup>[4,5]</sup>. 但 DDD 方案有效消除了各种非均匀现象对 STAP 算法的性能影响, 且各检测单元能并行处理, 适合工程实施.

STAP 杂波抑制的核心思想是基于杂波与待检测目标在角度-多普勒域的不同分布轨迹, 但常规二维傅氏谱分辨率较差, 限制了对慢速目标的检测. 文献[7,8]提出了采用稀疏重构技术直接获得待检测单元高分辨率二维谱的数据域 STAP 方案, 但在全空时域构建超完备基反演杂波与目标信号的反射强度, 其运算复杂度目前无法工程实现. 因此, 本文研究一种高效直接数据域 STAP 方法, 该方法通过时域降维在阵元-多普勒域稀疏重构高分辨率二维空时谱, 进而在图像域实现杂波抑

制和动目标检测。

## 2 空时谱降维稀疏重构算法

机载雷达几何构型如图 1 所示.假定天线为均匀线阵,阵元间距为半波长.考虑非正侧视阵,载机以速度  $V$  沿  $X$  轴飞行,偏航角为  $\varphi$ ,飞行高度为  $H$ ,天线阵元个数为  $N$ ,一次相干处理间隔的时域脉冲数为  $K$ .

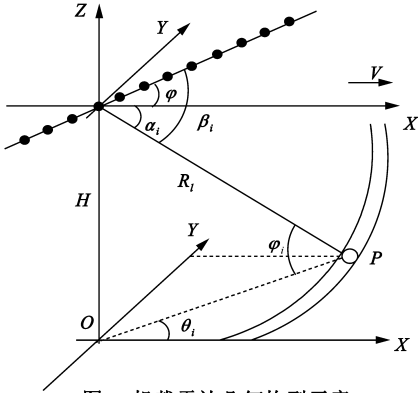


图1 机载雷达几何构型示意

第  $l$  个距离单元接收杂噪信号为<sup>[3]</sup>:

$$\mathbf{X}_l = \sum_{i=1}^{N_c} \sigma_i \mathbf{S}_i + \mathbf{N}_l \quad (1)$$

式中  $\sigma_i$  为该距离环第  $i$  个独立杂波散射源的信号幅度,  $\mathbf{S}_i$  为该散射源空时导引矢量,  $N_c$  为独立杂波散射源个数,  $\mathbf{N}_l$  为系统噪声. 对第  $i$  个独立杂波散射源  $P$ ,

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{S}_{si} \otimes \mathbf{S}_{di} \quad (2)$$

式中  $\otimes$  为 Kronecker 积,  $\mathbf{S}_{si}$ 、 $\mathbf{S}_{di}$  分别对应空域和时域导引矢量, 即

$$\mathbf{S}_{si} = \left[ 1 \exp[j2\pi \frac{d}{\lambda} \cos\beta_i] \cdots \exp[j2\pi(N-1) \frac{d}{\lambda} \cos\beta_i] \right]^T$$

$$\mathbf{S}_{di} = \left[ 1 \exp[j2\pi \frac{f_{di}}{f_r}] \cdots \exp[j2\pi(K-1) \frac{f_{di}}{f_r}] \right]^T \quad (3)$$

式中  $d$  为阵元间距,  $\lambda$  为雷达波长,  $f_r$  为脉冲重复频率 (PRF),  $f_{di}$  为散射源  $P$  的多普勒频率. 如图 1 所示,  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  分别为  $P$  相对载机速度  $V$  和天线轴向的夹角,  $\varphi_i$ 、 $\theta_i$  分别为  $P$  的俯仰角和方位角.

假定  $N = 32$ ,  $K = 32$ ,  $\varphi = 30^\circ$ , 图 2 给出了理想杂波空时谱的分布轨迹. 图 3 为二维 FFT 获得的杂波角度-多普勒谱. 可见, 二维傅氏谱副瓣高、分辨率差, 严重限制了对慢速动目标的检测. 鉴于此, 文献[7]提出对接收信号直接采用稀疏重构技术估计高分辨率二维空时谱, 即:

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \operatorname{argmin} \|\boldsymbol{\sigma}\|_0$$

$$\text{s.t.} \quad \|\mathbf{X}_l - \boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\sigma}\| \leq \epsilon \quad (4)$$

式中矢量  $\boldsymbol{\sigma}$  为第  $l$  个距离单元  $\mathbf{X}_l$  在角度-多普勒域的幅度分布, 即对应二维空时谱,  $\boldsymbol{\psi}$  为由空时导引矢量构

成的一组超完备基, 其维数为  $NK \times N_s N_t$ ,  $N_s$ 、 $N_t$  分别为角度域和多普勒域的量化单元. 在  $N_s \times N_t$  二维平面稀疏重构角度-多普勒谱, 其运算量约为  $O[(N_s N_t)(NK)^2]$ . 文献[7]取  $N_s = 6N$ 、 $N_t = 6K$ , 因此, 在空时域直接稀疏重构二维空时谱运算量极其庞大, 严重限制了实时处理.

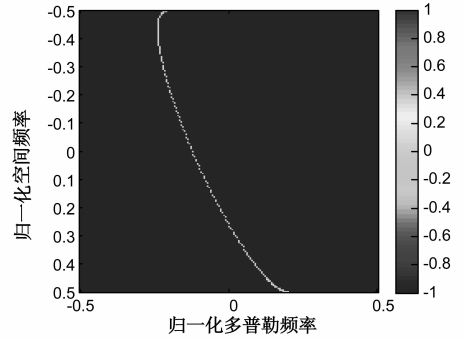


图2 杂波空时谱分布轨迹

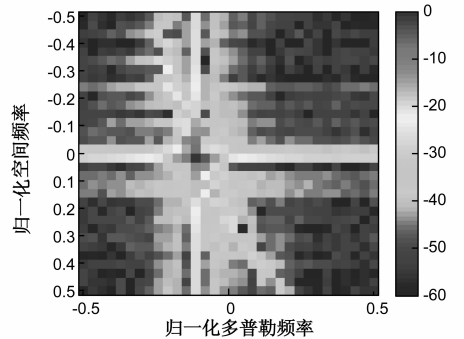


图3 杂波二维FFT谱

为降低 STAP 运算复杂度, 国内外学者提出了对杂波局域化分割进而分别抑制的降维 STAP<sup>[9]</sup> 概念, 如 JDL、3DT 算法. 因此, 借鉴降维 STAP, 杂波空时谱亦可在不同局域内分别稀疏重构. STAP 一般采用较多的时域脉冲, 因此本文研究基于时域降维的角度-多普勒谱高效稀疏重构方法, 其信号处理流程包括多普勒域降维和空域稀疏重构两个步骤.

### (1) 多普勒域降维

如图 2、图 3 所示, 不同空间分布的杂波散射源对应不同多普勒频率, 因此, 将杂波信号转换到多普勒域, 不同多普勒单元输出即实现了对杂波信号的局域降维. 假定多普勒域变换矩阵为  $\mathbf{F}_D$ , 将第  $l$  个距离单元接收信号  $\mathbf{X}_l$  逐脉冲排列, 即

$$\mathbf{X}_l^T = [\mathbf{S}_{l_1} \quad \mathbf{S}_{l_2} \cdots \mathbf{S}_{l_K}]_{N \times K} \quad (5)$$

式中  $\mathbf{S}_{l_i}$  为该距离单元在第  $i$  个脉冲各阵元接收信号矢量, 则阵元-多普勒域输出信号为

$$\mathbf{D}_l \mathbf{X}_l = \mathbf{X}_l^T \mathbf{F}_D^H = [\mathbf{S}_{Dl_1} \quad \mathbf{S}_{Dl_2} \cdots \mathbf{S}_{Dl_K}] \quad (6)$$

式中  $S_{Dl\_i}$  为第  $i$  个多普勒单元各阵元输出信号. 可见, 与文献[7,8]全空时稀疏重构不同,  $S_{Dl\_i}$  仅需在空域维稀疏重构该多普勒单元内的各散射源幅度信息.

### (2) 空域稀疏重构

经多普勒域降维后, 对阵元-多普勒数据逐多普勒单元进行空域稀疏重构即可获得高分辨的角度-多普勒谱. 下面以第  $i$  个多普勒单元输出信号为例, 推导算法流程. 由前述分析可知,

$$S_{Dl\_i} = \sum_{j=1}^N K\sigma_{i\_j} S_{si\_j} + N_i \quad (7)$$

式中  $\sigma_{i\_j}$ 、 $S_{si\_j}$  分别对应该多普勒单元内第  $j$  个独立散射源的信号幅度和空域导矢量,  $N_j$  为独立散射源个数,  $K$  为相干积累增益,  $N_i$  为噪声.

比较式(7)与式(1)可知,  $S_{Dl\_i}$  仅需对该多普勒单元的局域杂波在空域进行稀疏重构即可. 假定空域量化单元数亦为  $N_s$ , 构建  $N \times N_s$  的观测矩阵  $\Psi_i$ , 则优化方程为

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_i &= \operatorname{argmin} \|\sigma_i\|_1 \\ \text{s.t.} \quad &\|S_{Dl\_i} - \Psi_i \sigma_i\| \leq \epsilon_i \end{aligned} \quad (8)$$

式中采用  $l_1$  范数约束接收信号的空域稀疏性. 式(8)可采用凸优化、基追踪(BP)等<sup>[10,11]</sup>算法进行求解. 相比全空时域观测矩阵  $\Psi$ ,  $\Psi_i$  维数仅为  $N \times N_s$ , 因此运算量急剧下降. 对阵元-多普勒域数据逐多普勒单元进行空域稀疏重构, 即可获得高分辨率二维角度-多普勒谱.

## 3 知识辅助动目标检测算法

采用上述降维稀疏重构技术, 可获得杂波与待检测目标的高分辨率角度-多普勒谱, 因此可在图像域基于不同分布轨迹实现杂波抑制和目标检测. 文献[6]采用距离增长算法(RG)提取杂波与目标信息, 进而根据区域大小实现目标检测. 但与二维傅氏谱不同, 降维稀疏重构空时谱在由超完备基构成的角度域存在不连续性, 文献[6]方法会将不连续杂波误判为目标, 导致虚警率上升.

图4给出了改进的知识辅助动目标检测算法的信号流程图, 具体流程如下.

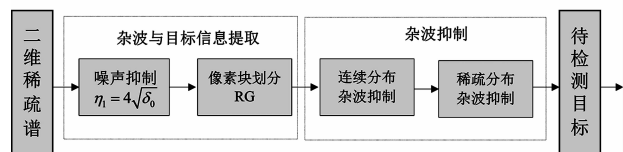


图4 知识辅助动目标检测算法流程图

### (1) 杂波与动目标信息提取

借鉴文献[6], 在清晰区估计降维稀疏重构空时谱的噪声功率  $\delta_0$ . 考虑雷达待检测目标信噪比一般不小

于 13dB, 本文设定阈值

$$\eta_1 = 4\sqrt{\delta_0} \quad (9)$$

将幅度低于  $\eta_1$  的像素单元幅值置零, 以滤除噪声和虚假目标.

对剩余像素单元, 采用 RG 算法提取杂波和目标信息<sup>[6]</sup>. 假定  $p_0^i$  为  $B_i$  像素块第一个不为零的像素点, 定义其与邻近非零像素点  $q$  的距离为:

$$d_{p_0^i, q}^q = \|p_0^i, q\| = \sqrt{\left(\frac{R_a}{r_a}\right)^2 (i_a - j_a)^2 + (i_d - j_d)^2} \quad (10)$$

式中  $(i_a, i_d)$ 、 $(j_a, j_d)$  分别对应  $p_0^i$  和  $q$  在空时谱中的角度和多普勒坐标,  $R_a$  为稀疏空时谱的空域分辨率,  $r_a = \frac{N}{N} R_a$  为比拟真实角分辨率的可调参数. 当  $q$  与像素块  $B_i$  的最小距离<sup>[6]</sup>

$$R = \min_j \|p_j^i, q\|, 1 \leq j \leq L \quad (11)$$

式中  $L$  为  $B_i$  中像素单元个数. 设定增长距离为  $D$ , 当  $R \leq D$ ,  $q$  归入像素块  $B_i$ . 以此类推, 通过 RG 可将所有非零像素单元划分为不同数据块.

### (2) 杂波抑制和动目标检测

经 RG 提取杂波和目标信息后, 为降低运算量采用两级级联方案首先剔除连续分布杂波, 进而根据杂波先验知识剔除不连续的稀疏分布杂波, 剩余信息即对应待检测动目标. 假定提取的不同信息块为  $B_k$ , 定义  $B_k$  对应的区域大小<sup>[6]</sup>为

$$S_k = \max_{i,j} \|p_i^k, p_j^k\|, 1 \leq i, j \leq H_0 \quad (12)$$

式中  $p_i^k$  为第  $k$  个数据块中的一个像素点,  $H_0$  为  $B_k$  的总像素. 根据  $S_k$  的大小, 可首先剔除连续分布杂波, 即

$$S_k > T_1 \quad (13)$$

则该区域对应杂波, 可直接剔除.  $T_1$  取值由角度-多普勒像素分辨率决定.

剩余稀疏分布信息块可分别提取该信息块的角度-多普勒信息, 定义  $B_l$  对应的角度-多普勒信息为

$$(\beta_l, f_l) = \operatorname{pos}(p_{\text{mid}}^l) \quad (14)$$

式中  $p_{\text{mid}}^l$  为  $B_l$  角度-多普勒域中心像素单元,  $\operatorname{pos}(\cdot)$  为取该像素单元二维坐标值运算. 由式(3)可知, 根据载机高度、载机速度和阵列构型等先验知识, 可估算空间位置  $\beta_l$  处的杂波相应多普勒频率  $\hat{f}_l$ <sup>[12,13]</sup>.  $f_l \approx \hat{f}_l$  时, 该信息块即对应杂波. 因此, 检测出的动目标满足

$$|f_l - \hat{f}_l| > T_2 \quad (15)$$

式中  $|\cdot|$  为绝对值运算, 阈值  $T_2$  由多普勒分辨率和系统误差决定. 可见, 两级级联检测同时实现了对地海杂波的抑制.

## 4 性能分析

雷达系统仿真参数如表1所示, 线性阵列空域阵元

数  $N = 32$ , 时域脉冲数  $K = 128$ , 载机偏航角  $\varphi = 30^\circ$ . 仿真实验中  $N_s = 6N$ ,  $X_l$  为第 100 个距离单元接收信号. 图 5 分别给出了两维 FFT 和降维稀疏重构获得的空时谱. 相比二维傅氏谱, 降维稀疏重构谱分辨率极高, 且有效避免了主杂波副瓣引起的频谱展宽. 当机载雷达时域相干积累脉冲数增加时, 阵元-多普勒域杂波数据的空域稀疏性也将得到改善, 因此采用降维稀疏重构估计的二维空时谱分辨率也将相应提高.

表 1 雷达系统参数

参数名称	参数数值
脉冲重复频率	5000Hz
采样带宽	5MHz
阵元个数	32
载机速度	150m/s
CPI 内脉冲个数	128
载机飞行高度	8000m
阵元间距与波长比值	1/2
阵元杂噪比	40dB

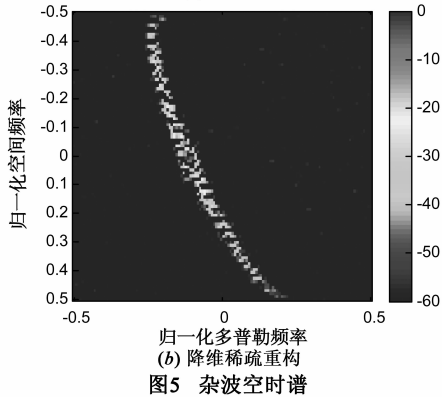
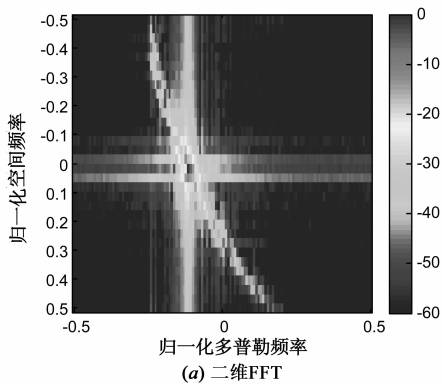


图 5 杂波空时谱

低, 目标淹没在副瓣杂波中无法检测; 稀疏重构谱分辨率高, 有效规避了杂波谱副瓣展宽及噪声基底抬高, 因此杂波和目标信息均能有效提取. 图 7 分别为一级检测和二级检测的输出结果. 一级检测根据像素块单元数

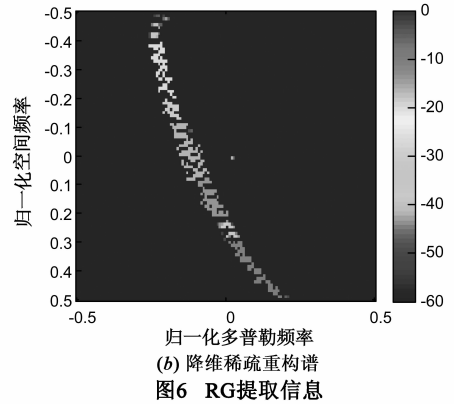
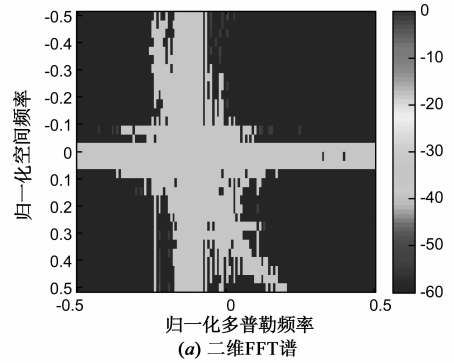


图 6 RG 提取信息

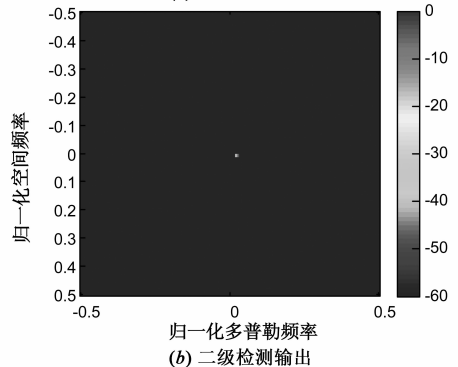
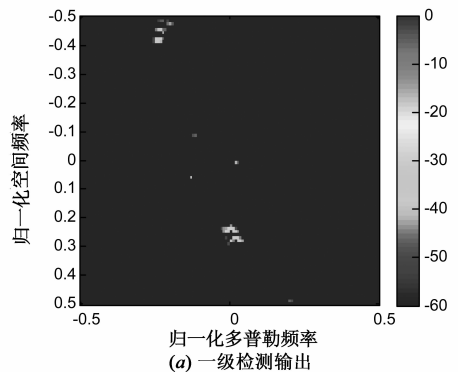


图 7 知识辅助动目标检测输出

下面分析知识辅助动目标检测算法的性能. 在检测单元注入一个待检测目标, 其空间角对应主波束指向, 径向速度为 10m/s. 图 6 分别给出了基于二维傅氏谱和稀疏重构谱 RG 算法提取的杂波与目标信息, 其中不同像素块对应不同颜色. 可见, 二维傅氏谱分辨率

目能快速滤除大面积分布的连续杂波,而二级检测根据杂波角度-多普勒先验知识进一步滤除稀疏分布的点杂波.因此,知识辅助动目标检测算法运算量小,鲁棒性强,且能有效降低点杂波引起的虚警概率.

## 5 结论

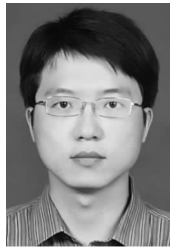
本文研究基于降维稀疏重构谱的高效数据域 STAP 方案,并提出了结合杂波先验知识的动目标检测算法.仿真结果有效验证了本文方案的有效性.降维稀疏重构对时域降维数据逐多普勒单元估计高分辨率空间谱,相比全空时稀疏重构系统运算量由  $O((N_s N_t)(NK)^2)$  锐减为  $O[KN_s N^2]$ .因此本文方案运算量小,且适合工程实时并行处理.

## 参考文献

- [1] L E Brennan, J D Mallet, I S Reed. Theory of adaptive radar [J]. IEEE Trans on AES, 1973, 9(2): 237 - 251.
- [2] R Klemm. The Applications of Space-time Adaptive Processing [M]. London, UK: IEE, 2004.
- [3] W L Melvin. A STAP overview [J]. IEEE Aerospace and Electronic System Magazine, 2004, 19(1): 19 - 35.
- [4] T Sarkar, H Wang, P Shennyun, et al. A deterministic least-squares approach to space time adaptive processing (STAP) [J]. IEEE Trans on AP, 2001, 49(1): 91 - 103.
- [5] C Diego, B Wolfram. A robust direct data domain approach for STAP [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2012, 60(3): 1283 - 1294.
- [6] D Hai, H Braham, C W Michael. Image feature-based space-time processing for ground moving target detection [J]. IEEE Signal Processing Letter, 2006, 13(4): 216 - 219.
- [7] 孙珂, 张颢, 李刚, 等. 基于杂波稀疏恢复的空时自适应处理 [J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1389 - 1393.  
Sun Ke, Zhang Hao, Li Gang, et al. STAP via sparse recovery of clutter spectrum [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6): 1389 - 1393. (in Chinese)

- [8] Z Yang, R C de Lamare, X Li. Sparsity-aware space-time adaptive processing algorithms with  $L_1$ -norm regularization for airborne radar [J]. IET Signal Processing, 2012, 6(5): 413 - 423.
- [9] Z H Zhang, W C Xie, W D Hu, W X Yu. Local degrees of freedom of airborne radar clutter for STAP [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter, 2009, 6(1): 97 - 101.
- [10] W Honglin, W Shu. Adaptive sparsity matching pursuit algorithm for sparse reconstruction [J]. IEEE Signal Processing Letter, 2012, 19(8): 471 - 474.
- [11] C G Ali, C Volkan, H M James. Bearing estimation via spatial sparsity using compressive sensing [J]. IEEE Trans on AES, 2012, 48(2): 1358 - 1369.
- [12] P Ries, F D Lapierre, J G Verly. Geometry-induced range-dependence compensation for bistatic STAP with conformal array [J]. IEEE Trans on AES, 2011, 47(1): 275 - 294.
- [13] Z Xumin, L Jian, P Stoica. Knowledge-aided space-time adaptive processing [J]. IEEE Trans on AES, 2011, 47(2): 1325 - 1336.

## 作者简介



**沈明威** 男, 1981 年 7 月出生, 江苏省苏州市人. 2003 年和 2008 年分别在南京航空航天大学获工学学士和工学博士学位. 现为河海大学副教授, 主要从事空时自适应处理和 SAR/GMTI 的研究工作.

E-mail: smw\_nuaa@hotmail.com



**王杰** 男, 1989 年月出生, 江苏省常熟市人. 现为河海大学信号与信息处理硕士研究生. 研究方向为空时自适应处理.

E-mail: jiewanghhu@gmail.com