

改进的机载 MIMO 雷达局域联合自适应处理方法

刘 洋, 张永顺, 刘汉伟, 郭艺夺

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 基于 MIMO 雷达的空时自适应处理技术在滤波过程中, 由于大样本需求数和高运算复杂度的影响, 导致杂波抑制效果下降。为解决上述问题, 利用局部分块操作的思路, 提出了一种改进 MIMO-STAP 降维处理方法。传统 JDL 算法需将阵元-脉冲域中的回波信息转换到波束-Doppler 域。该方法在此基础上, 通过调整时域主通道两侧的辅助通道以及空域主波束两侧的辅助波束数目, 减小时域自由度, 增强波束指向性, 进而提升系统检测性能。经仿真, 改进的 JDL 算法样本需求数和运算量明显降低, 并且对阵元以及通道误差等系统自身的误差影响也有较强的鲁棒性, 与传统的 JDL 方法相比, 系统改善因子平均提高 3 dB 左右。

关键词 机载 MIMO 雷达; 杂波抑制; 空时自适应处理; 改进的 JDL 算法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.04.005

中图分类号 V243.2; TN959 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)04-0024-04

Improved Joint Domain Localized Method in Airborne MIMO Radar

LIU Yang, ZHANG Yongshun, LIU Hanwei, GUO Yiduo

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

Abstract: Aimed at the problems that large number of training requirement and computational load influence lead to a decline in effectiveness of clutter suppression in the airborne MIMO radar, this paper presents an improved reduced-dimension method by a thinking of dividing operation into local plot. The received data in the antennas-pulse domain is firstly transformed to the beam-Doppler domain, and then the number of auxiliary channels on both sides of main channels in time domain and space domain is adjusted. in order to reduce the degree of freedom in time domain, the paper enhances the directivity of beam and improves detection performance. The simulation results demonstrate that the proposed method can dramatically reduce the computational load and training requirement. The result shows that the system improvement factor of the proposed method has an increase of 3 dB compared to the traditional JDL method under the conditions of errors.

Key words: airborne MIMO radar; clutter suppression; STAP; improved JDL method

多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 雷达^[1-3]自 2003 年问世以来, 因其多发多收和波形正交的特有性质, 天线规模远远小于相

同规格的相控阵雷达^[4], 受到了国内外专家学者的广泛关注。机载 MIMO 雷达的诞生, 在一定程度上弥补了因机身重量和天线孔径大小受限而在性能配

收稿日期: 2017-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(61501501)

作者简介: 刘 洋(1992—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士生, 主要从事空时自适应处理方法研究. E-mail: liuyang77118@163.com

引用格式: 刘洋, 张永顺, 刘汉伟, 等. 改进的机载 MIMO 雷达局域联合自适应处理方法 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(4):24-27. LIU Yang, ZHANG Yongshun, LIU Hanwei, et al. Improved Joint Domain Localized Method in Airborne MIMO Radar [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(4):24-27.

置上有所削弱的现实需求。空时自适应处理^[5-6] (Space-Time Adaptive Processing, STAP) 技术可以在杂波空时二维平面上,自适应地形成滤波凹口,对于运动目标的检测起到重要作用。为了充分发挥 MIMO 雷达和 STAP 技术的作用,提高机载雷达的信号检测性能,MIMO-STAP 技术应运而生^[7]。

在实际应用过程中,由于 MIMO 体制新增加了接收阵元一维的自由度,使得回波信号的数据量由原有的 NK 变为 MNK ,这对于杂波协方差矩阵 (Clutter Covariance Matrix, CCM) 的求逆以及空时准最优滤波器的设计是十分不利的,故如何有效减小系统自由度以及运算量的负担,成为 MIMO-STAP 技术^[8-9] 研究的重点。Hong. W 等人提出了局域联合自适应算法 (Joint Domain Localized, JDL)^[10-11],该方法先将数据通过二维 DFT 变换,转换到波束-Doppler 域,再对其邻近的数个二维波束施行局部自反馈处理,但其性能受系统误差影响较大;之后王永良等人提出了广义相邻多波束法 (Generalized Adjacent Multiple-Beam, GMB)^[12],使得维数进一步降低,但杂波抑制效果一般^[13],可以根据取值域的不同,进一步优化系统构型。

为解决上述问题,本文进一步沿袭局域化思想^[14,15],提出了一种改进的局域联合自适应处理方法,该方法通过调整辅助通道以及辅助波束的数目,重新设计了一种系统结构,在尽可能保持原有检测性能的情况下,降低数据处理的运算复杂度。

1 杂波模型

雷达天线正侧视设置,呈直线型均匀分布。在飞行过程中,由于飞机离地面距离较远,使得在一次相干处理间隔 (Coherent Processing Interval, CPI) 内,可以近似认为雷达平台与信号源的相对位置没有变化。时间域脉冲数为 K ,且 M 个发射波形相互正交。

通过矢量表现出机载雷达的杂波形式,则其时间域,发射空域和接收空域的导向矢量分别是:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_T(\omega_t) = (1, e^{j\omega_t(\theta, \varphi)}, \dots, e^{j\omega_t(\theta, \varphi)(K-1)})^T \in \mathbf{C}^{K \times 1} \\ \mathbf{S}_s(\omega_s) = (1, e^{j\omega_s(\theta, \varphi)\alpha}, \dots, e^{j\omega_s(\theta, \varphi)\alpha(M-1)})^T \in \mathbf{C}^{M \times 1} \\ \mathbf{S}_{sr}(\omega_s) = (1, e^{j\omega_s(\theta, \varphi)}, \dots, e^{j\omega_s(\theta, \varphi)(N-1)})^T \in \mathbf{C}^{N \times 1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\alpha = d_T/d_R$ 是发射阵间隔距离的比值, d_R 是接收阵间距, d_T 是发射阵间距;空域和时域的角频率分别表示为 ω_s 和 ω_t :

$$\begin{cases} \omega_s(\theta, \varphi) = 2\pi \cos\theta \cos\varphi / \lambda \\ \omega_t(\theta, \varphi) = 4\pi VT \cos\theta \cos\varphi / \lambda \end{cases} \quad (2)$$

式中: T 为脉冲重复周期; λ 为波长; V 为速度; φ 表

示信号散射源的高低角, θ 表示方位角。

第 i 个杂波点源的回波模型,可以通过各发射信号与各信号脉冲的相互匹配滤波得到:

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_i &= \rho_i \mathbf{S}_T(\omega_t) \otimes \mathbf{S}_s(\omega_s) \otimes \mathbf{S}_{sr}(\omega_s) = \\ &\rho_i \mathbf{S}(\omega_s, \omega_t) \in \mathbf{C}^{MNK \times 1} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ρ_i 为接收处理后回波信号幅度,且服从零均值, σ^2 方差的独立复高斯分布; \otimes 表示 kronecker 积。

总的导向矢量为:

$$\mathbf{S}(\omega_s, \omega_t) = \mathbf{S}_T(\omega_t) \otimes \mathbf{S}_s(\omega_s) \otimes \mathbf{S}_{sr}(\omega_s) \quad (4)$$

该距离环上总的杂波矢量可表示为:

$$\mathbf{y} = \sum_{i=1}^{N_c} \mathbf{c}_i = \sum_{i=1}^{N_c} \rho_i \mathbf{S}(\omega_s, \omega_t) \in \mathbf{C}^{MNK \times 1} \quad (5)$$

最终得到接收信号的 CCM:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_c &= \sum_{i=1}^{N_c} \sigma_i^2 \mathbf{S}(\omega_s, \omega_t) \mathbf{S}^H(\omega_s, \omega_t) = \\ &E[\mathbf{y}\mathbf{y}^H] \in \mathbf{C}^{MNK \times MNK} \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $E[\cdot]$ 和 $(\cdot)^H$ 分别表示期望和共轭转置。

2 改进算法

虽然在杂波模型中, MIMO 雷达的数据形式表现为由发射、接收和时域 3 种导向矢量共同构成的数据结构,但实际上阵元由于发射波形互相垂直,不能联合构成波束,故机载雷达多波束形成过程,实际上仍然是以二维处理形式进行的。之后再阵元脉冲域,通过空时两维的傅立叶变换,转换到波束-Doppler 域。选取预估计区域,根据线性约束最小输出功率准则,进行自适应处理^[5]。

JDL 算法相当于选取一个矩形区域内的所有空域波束以及时域通道,系统自由度最大程度地得到保留,没有较好地解决数据处理负担的问题;而 GMB 算法只选择主波束以及主通道一路两侧的十字形通路,极度压缩系统自由度,带来的问题是处理过程受系统误差以及环境影响较大,信号检测性能严重受限。

从 JDL 算法与 GMB 算法的优劣性出发,适当调整通道以及波束数量,力求在保持系统检测性能和稳定性的同时,降低系统自由度,减小计算复杂性。基于以上思路,本文设计了一种改进的 MIMO-STAP 降维处理算法,图 1 表示该系统的原理图。

通过对辅助通道的重新选取可以看出,由于发射通道发射宽波束,无指向性,没有波束选择的概念,而接收通道则可以通过辅助通道的选取进行波束形成,故两者共同形成的空域导向矢量只与接收通道有关。新方法相当于在 JDL 算法的基础上,减少了主时域通道两侧的 2 个辅助通道以及主空域波束两侧的 4 个

辅助波束,并且在空域原有主波束两侧各增加了2个独立辅助波束,进而增强空域波束指向性。

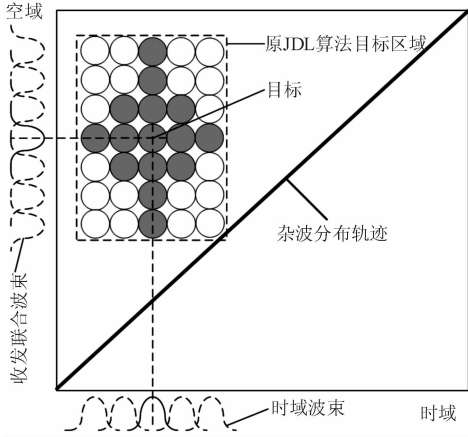


图1 改进JDL方法系统原理图

Fig. 1 Principle of improved JDL method

上述辅助通道和波束的选取过程概括为数学问题,即设计空时导向矢量变换矩阵 \mathbf{T} :

$$\mathbf{T} = [\mathbf{T}_1 \quad \mathbf{T}_2 \quad \mathbf{T}_3] \quad (7)$$

式中:

$$\mathbf{T}_1 = [\mathbf{S}_d(\omega_{i-2}), \dots, \mathbf{S}_d(\omega_{i+2})] \otimes \dots$$

$$[\mathbf{S}_i(\omega_{j-3}), \dots, \mathbf{S}_i(\omega_{j+3})] \otimes \mathbf{S}_r(\omega_k)$$

$$\mathbf{T}_2 = \mathbf{S}_d(\omega_i) \otimes [\mathbf{S}_i(\omega_{j-3}), \dots, \mathbf{S}_i(\omega_{j+3})] \otimes$$

$$[\mathbf{S}_r(\omega_{k-3}), \dots, \mathbf{S}_r(\omega_{k-1}), \mathbf{S}_r(\omega_{k+1}), \dots, \mathbf{S}_r(\omega_{k+3})]$$

$$\mathbf{T}_3 = [\mathbf{S}_d(\omega_{i-1}), \mathbf{S}_d(\omega_{i+1})] \otimes \dots$$

$$[\mathbf{S}_i(\omega_{j-3}), \dots, \mathbf{S}_i(\omega_{j+3})] \otimes [\mathbf{S}_r(\omega_{k-1}), \mathbf{S}_r(\omega_{k+1})]$$

式中: $\mathbf{S}_d(\omega_i)$ 是时域主通道的导向矢量; $\mathbf{S}_i(\omega_j)$ 是发射主波束的导向矢量; $\mathbf{S}_r(\omega_k)$ 是接收主波束的导向矢量; ω_i ($i=1, 2, \dots, q$) 表示第 i 个归一化的时域多普勒频率; ω_j ($j=1, 2, \dots, l$) 表示为第 j 个归一化的发射空域波束角频率; ω_k ($k=1, 2, \dots, p$) 表示第 k 个归一化的接收空域波束角频率。

其中:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_i(\omega_j) = [a_1, a_2 e^{j\omega_j \alpha}, \dots, a_M e^{j\omega_j \alpha(M-1)}]^T \\ \mathbf{S}_r(\omega_k) = [\omega_1, \omega_2 e^{j\omega_k}, \dots, \omega_N e^{j\omega_k(N-1)}]^T \\ \mathbf{S}_d(\omega_i) = [h_1, h_2 e^{j\omega_i}, \dots, h_K e^{j\omega_i(K-1)}]^T \end{cases} \quad (8)$$

式中: a_m ($m=1, 2, \dots, M$) 为发射静态权系数, ω_n ($n=1, 2, \dots, N$) 为接收静态权系数, h_k ($k=1, 2, \dots, K$) 为时域静态权系数。

回波信号的降维处理过程可以表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{Z} = \mathbf{T}^H \mathbf{y} \\ \tilde{\mathbf{R}}_c = \mathbf{T}^H \mathbf{R}_c \mathbf{T} \\ \tilde{\mathbf{S}}(\omega_s, \omega_t) = \mathbf{T}^H \mathbf{S}(\omega_s, \omega_t) \end{cases} \quad (9)$$

式中: \mathbf{Z} 为处理得到的信号回波数据; $\tilde{\mathbf{R}}_c$ 为处理后的 CCM; $\tilde{\mathbf{S}}(\omega_s, \omega_t)$ 为处理后的空时导向矢量。

根据线性约束最小方差准则,可算出准最优滤

波器的权矢量 \mathbf{W} 为:

$$\mathbf{W} = \frac{\tilde{\mathbf{R}}_c^{-1} \tilde{\mathbf{S}}(\omega_s, \omega_t)}{\tilde{\mathbf{S}}^H(\omega_s, \omega_t) \tilde{\mathbf{R}}_c^{-1} \tilde{\mathbf{S}}(\omega_s, \omega_t)} \quad (10)$$

对于杂波信号抑制的情况可以由改善因子 IF 来描述,即输出信杂噪比和输入信杂噪比之比 $\frac{\eta_{\text{SCNR}_o}}{\eta_{\text{SCNR}_i}}$:

$$IF = \frac{|\mathbf{W}^H \mathbf{S}|^2 (\text{CNR}_i + 1) \sigma_i^2}{\mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W}} \quad (11)$$

式中: σ_i^2 是噪声的输入功率; CNR_i 是输入杂噪比。

3 仿真试验

对最优处理算法、JDL 算法、GMB 算法^[16] 和本文方法通过计算机仿真比较性能。参数设定为:接收阵元,发射阵元以及脉冲数目相等,均取 8,接收时各阵元之间相距 0.115 m,接收阵元间距比 $\alpha=5$,飞行高度 $H=8$ km,速度 $V=140$ m/s,波长 $\lambda=0.23$ m,脉冲重复频率 $f_r=2\,434.8$ Hz,杂波信号的多普勒频率表示为 f_d ,杂噪比 $\text{CNR}=30$ dB。JDL 选定 5 个接收波束通道,7 个发射波束通道和 5 个多普勒通道。改进的 JDL 算法接收波束辅助通道数增加 2。

试验给出了 5 种情况,仿真结果见图 2:

由图 2(a)和(d)可知,在理想以及存在杂波起伏情况下,最优处理算法的性能最好,其余几种算法效果相差不大。算法的系统自由度越高,改善因子性能越好,杂波抑制效果与系统自由度呈现正相关性;由图 2(b)、(c)和(e)可以看出,在加入阵元以及通道误差之后,各种方法的检测效果都受到不同程度的影响。其中最优处理算法效果依然最佳,但传统 JDL 算法的检测性能明显下降,GMB 算法略优于 JDL 算法。而改进的 JDL 算法则对误差的敏感程度不高,对波束的针对性更强,这是因为选取辅助阵元数目的降低使系统内部误差带来的积累效应也相应削弱,其效果仅次于最优处理算法。但相较于其他算法,系统改善因子平均提高 3 dB。

表 1 为各种方法的计算量和所需样本数,可见改进的 JDL 算法较最优处理算法以及传统的 JDL 算法,无论是在运算量上还是所需样本数上,都有显著的降低。

表 1 各算法计算量和所需样本数

Tab. 1 The number of training requirement and computational load of each algorithm

	OPT	JDL	改进 JDL	GMB
运算量	$O[(512)^3]$	$O[(160)^3]$	$O[(72)^3]$	$O[(48)^3]$
所需样本数	1 024	320	142	96

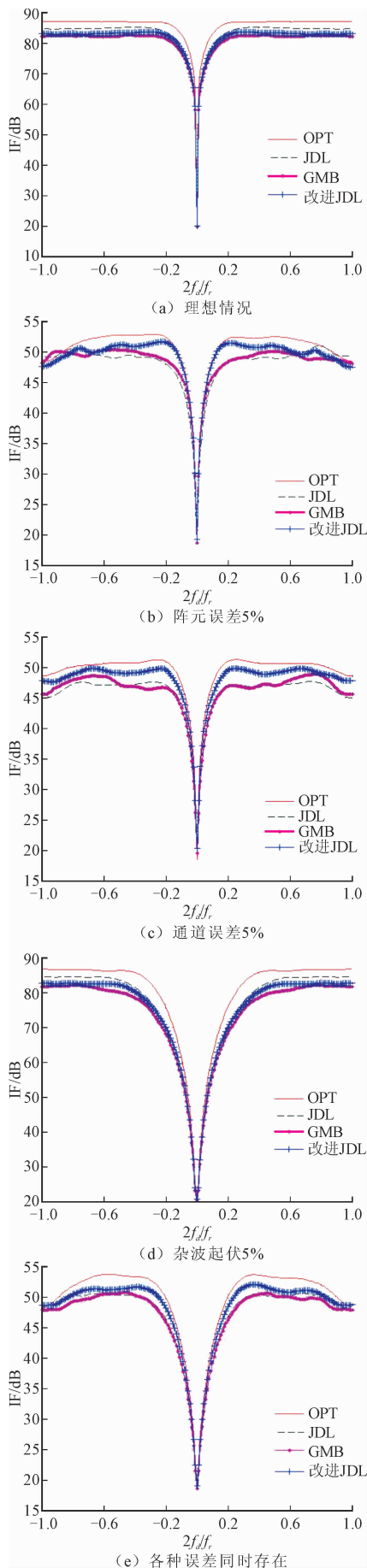


图 2 不同误差条件下改善因子比较

Fig. 2 Comparisons of performance in different error conditions

4 结语

针对 MIMO-STAP 处理过程中杂波抑制性能和计算量难以兼顾的问题,利用局域化降维处理思想,通过调整辅助通道以及辅助波束的数目,提出一种改进的 JDL 算法。分别在理想和有误差的情况下,通过计算机进行了仿真试验,结果表明:改进的 JDL 算法运算量降低,抑制杂波的能力保持较好,尤其是当系统混入各种误差时,系统稳定性较高,杂波回波数据处理时间大幅度减少,具有一定的工程实现价值。

参考文献(References):

- [1] Chen Jun, Patt Thomas G. Energy Efficiency of Space and Polarization MIMO Communication With Packet Erasures Over Wireless Fading Channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(12): 6557-6569.
- [2] FISHER E, HAIMOVICH A, BLUM R S. Spatial Diversity in Radar-Models and Detection Performance [J]. IEEE Transactions on Signal Process, 2006, 54(3): 823-838.
- [3] HAIMOVICH A M, BLUM R S, LENARD J. MIMO radar with widely separated antennas [J]. IEEE Signal Process Magazine, 2008, 25(1): 116-129.
- [4] BLISS D W, FORAYTHE K W. Multiple-Input Multiple-output (MIMO) Radar and Imaging: Degrees of Freedom and Resolution [C]// Proceedings of the 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems, Computers, Monterey, USA, 2003: 54-59.
- [5] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
WANG Y L, PENG Y N. Space-Time Adaptive Processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. (in Chinese)
- [6] LOUIS B. Fertig, Analytical Expressions for Space-time Adaptive Processing Performance [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(1): 42-53.
- [7] CHEN C Y, VAIDYANATHAN P P. MIMO Radar Space-time Adaptive Processing Using Prolate Spheroidal Wave Functions [J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2008, 56(2): 623-635.
- [8] 王珽, 张剑云, 郑志东. 机载 MIMO 雷达两级降维空时自适应处理方法 [J]. 数据采集与处理, 2014, 29(4): 542-548.

- Link Layer of Selective Repeat Protocol Based on Quantum Teleportation [J]. Acta Phys Sin, 2012, 61(2): 20303. (in Chinese)
- [15] PAN J W, BOUWMEESTER D, WEINFURTER H. Experimental Entanglement Swapping: Entangling Photons that Never Interacted [J]. Physical Review Letter, 1998, 80(18): 3891-3894.
- [16] DUAN L M, LUKIN M D, CIRAC J I. Long-Distance Quantum Communication with Atomic Ensembles and Linear Optics [J]. Nature, 2001, 414: 413-418.
- [17] ZHAO B, CHEN Z B, CHEN Y A. Robust Creation of Entanglement Between Remote Memory Qubits [J]. Physical Review Letter, 2007, 98: 240502-240506.
- [18] HWANG W Y. Quantum Key Distribution with High Loss: Toward Global Secure Communication [J]. Physical Review Letter, 2003, 91(5): 57901.
- [19] 孙献璞, 张艳玲, 宋彬. 采用动态令牌的 MANET 多址接入协议 [J]. 电子学报, 2006, 34(1): 118-122. SUN X P, ZHANG Y L, SONG B. Research on Multiple Access Control Protocol with Dynamic Token Algorithm for MANET [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(1): 118-122. (in Chinese)
- [20] 张天鹏. 量子安全直接通信及 QTDMC 技术研究 [D]. 西安:西安电子科技大学, 2009. ZHANG T P. Research on Quantum Secure Direct Communication and Quantum Time Division Multisuser Communication [D]. Xi'an: Xidian University, 2015. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

(上接第 27 页)

- WANG T, ZHANG J Y, ZHENG Z D. Two-Stage Reduced-Dimension STAP Method for Airborne MIMO Radar [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2014, 29(4): 542-548. (in Chinese)
- [9] 高伟, 黄建国, 王海强, 等. 基于子空间估计的 MIMO 阵列降维 STAP 方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(5): 876-881. GAO W, HUANG J G, WANG H Q, et al. Reduced-Rank STAP method for MIMO array based on estimation of subspace [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(5): 876-881. (in Chinese)
- [10] WANG H, CAI L. On adaptive Spatial-Temporal Processing for Airborne Surveillance Radar Systems [J]. IEEE Trans, 1994, AES-30(3): 660-670.
- [11] YANG X P, LIU Y X, LGON T. Improved Joint Domain Localized STAP Algorithm Based on Mainbeam Clutter Cancellation [C]// IEEE International Conference on Microwave Technology and Computational Electromagnetics, 2011: 501-504.
- [12] 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 Electron Syst, 2003, 39(1): 70-81.
- [13] 张燕, 马亮, 陈春芳. 空时在适应处理算法性能影响因素分析 [J]. 制导与引信, 2013, 34(4): 29-34. ZHANG Y, MA L, CHEN C F. Analysis on Factors of Affecting Detection Performance of STAP Algorithm [J]. Guidance and Fuze, 2013, 34(4): 29-34. (in Chinese)
- [14] 吕晖, 冯大政, 和洁, 等. 机载多输入多输出雷达局域化降维杂波抑制方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 38(2): 88-92. LV H, FENG D Z, HE J, et al. Localized Reduced-dimension Clutter Suppression Method for the Airborne MIMO Radar [J]. Journal of Xidian University, 2011, 38(2): 88-92. (in Chinese)
- [15] 张贝贝. 一种空时自适应处理的降维矩阵改进算法 [J]. 探测与控制学报, 2010, 32(6): 37-41. ZHANG B B. An Improved STAP Algorithm Based on Dimension Reduction [J]. Journal of Detection & Control, 2010, 32(6): 37-41. (in Chinese)
- [16] 王艳萍. 机载 MIMO 雷达的降维 STAP 方法 [D]. 西安:西安电子科技大学, 2010. WANG Y P. Dimension-reduced STAP Algorithm in Airborne MIMO Radar [D]. Xi'an: Journal of Xidian University, 2010. (in Chinese)

(编辑:徐敏)