

机载雷达近程杂波高效自适应抑制算法

沈明威¹ 孟祥东² 朱岱寅³

(1. 河海大学计算机与信息学院, 南京, 211100; 2. 南京电子技术研究所, 南京, 210039;

3. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016)

摘要:针对机载雷达近程杂波抑制提出了一种高效俯仰向空域自适应处理算法。该算法从雷达系统设计出发, 在每一次相干积累时间内采用仅包含近程杂波的第一个填零脉冲为训练样本。同时, 在俯仰向进行降维处理形成和、差波束, 并基于旁瓣相消原理利用俯仰差波束自适应对消和波束中的近程杂波。理论分析和仿真结果表明, 本文方案能高效滤除近程杂波, 且俯仰主波束保形性能好, 运算量小, 适合工程应用。

关键词:机载雷达; 近程杂波; 空时自适应处理(STAP)

中图分类号: TN958. 92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2013)01-0088-06

Efficient Adaptive Algorithm for Short-Range Clutter Suppression of Airborne Radar

Shen Mingwei¹, Meng Xiangdong², Zhu Daiyin³

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

2. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, 210039, China;

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

Abstract: An efficient elevation-domain adaptive algorithm for airborne radar short-range clutter suppression is presented. According to radar system design, the first received pulse, where only the short-range clutter arrives, is used as the training set within each coherent processing interval (CPI). In addition, the elevation sum and difference beams are transformed by reduced-dimension processing. Thus, based on the side lobe cancellation principle, the difference beam can be used to cancel the short-range clutter received in the sum beam. Theoretical analysis and simulation results demonstrate that, the proposed scheme can eliminate the short-range clutter sufficiently, and have the advantages of improved main beam pattern and low computational load, which make it feasible for engineering application.

Key words: airborne radar; short-range clutter; space-time adaptive processing (STAP)

机载雷达下视工作, 地杂波频谱宽、强度大, 对杂波进行有效抑制是提高探测性能的核心手段。空时自适应处理(Space-time adaptive processing, STAP)是机载雷达杂波抑制的有效方法, 美国 E2-D 机载预警雷达已成功采用此技术。STAP 作为

一种统计自适应处理算法, 只有在杂波满足独立同分布(IID)条件下性能才能充分发挥^[1-3]。

机载雷达一般采用脉冲多普勒(PD)体制。当雷达脉冲重复频率(PRF)选择中高频时, 就会存在距离模糊, 此时在一个距离单元内会同时接收多个

基金项目:国家自然科学基金青年基金(61201459)资助项目;江苏省自然科学基金(BK2012408)资助项目;中央高校基本业务费(2012B6014)资助项目。

收稿日期: 2012-02-23; **修订日期:** 2012-05-24

通信作者: 沈明威, 男, 副教授, 1981 年出生, E-mail: smw_nuaa@hotmail.com。

距离环的杂波信号,其中第一次模糊距离的杂波距离最近,强度最大,文献[4,5]定义将其为近程杂波,并对其特性进行了深入分析。当机载雷达采用非正侧视阵时,近程杂波与远程杂波谱分布轨迹偏差极大,且近程杂波空时谱随距离变化极快,导致不同距离单元的杂波特性严重非平稳,后续 STAP 的杂波抑制性能急剧下降。

针对距离非平稳杂波已有很多算法来补偿不同距离单元间的非均匀性,如自适应角度-多普勒补偿、配准补偿等^[6-13]。但在距离模糊条件下,远程杂波和近程杂波构成了不同的杂波谱,补偿算法无法同时兼顾各次模糊距离的杂波。因此,此类算法无法改善后续 STAP 的杂波抑制性能。文献[4,5]提出先采用俯仰滤波抑制近程杂波,进而采用 STAP 抑制远程杂波的信号处理算法,这是比较可行的方案。但在工程应用中,由于系统误差、训练样本数有限等条件限制,其性能也会下降。本文针对工程实际,在俯仰空域自适应抑制思想的基础上进一步改进,提出了一种高效、鲁棒的近程杂波自适应抑制算法。该算法包括训练样本选取、俯仰空域降维、近程杂波抑制 3 个步骤。与文献[5]算法相比,本文算法收敛速度快、运算量小、俯仰自适应主波束保形好,能显著改善后续 STAP 的杂波抑制。

1 俯仰空域自适应算法的性能局限

机载雷达非正侧面阵几何关系如图 1 所示。假定天线为矩形阵,阵元行列间距均为半波长。设天线平面的法线方向为 x 轴,天线平面的横向为 y 轴,垂直于地面向上的方向为 z 轴。载机的飞行方向偏离 y 轴左侧的角度为 α ;雷达主瓣波束指向与阵列天线水平轴的夹角为 ψ_1 ;不同距离的地面杂波到阵列天线的俯仰角不同。俯仰角定义为雷达射线与天线阵面法线的夹角,如图 1 所示的 φ_1 , φ_2 。杂波多普勒频率与距离的关系为^[4]

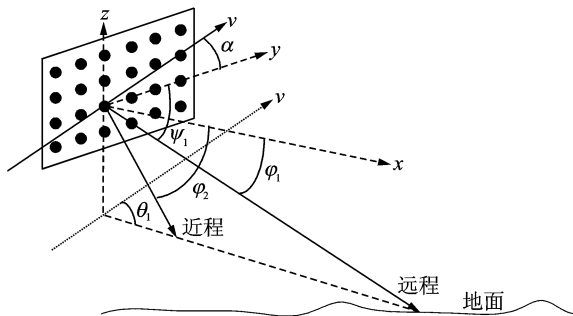


图 1 非正侧面阵天线几何关系

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \left(\cos\varphi_c \cos\alpha - \sqrt{1 - \left(\frac{H}{R_c}\right)^2 - \cos^2\varphi_c} \sin\alpha \right) \quad (1)$$

式中: v 为载机速度; λ 为雷达波长; R_c 为杂波斜距; φ_c 为杂波相对于天线平面横向的夹角。

对于非正侧面阵,各次模糊距离的杂波二维谱为椭圆曲线,且不同距离的杂波二维谱不重合。图 2 所示的角度-多普勒谱是前视阵下同一个距离单元不同模糊距离的杂波二维谱线,其中第一次模糊距离的近程杂波与远程其他各次模糊距离的杂波谱显著偏离。图 3 给出了雷达接收杂波的距离-多普勒谱,其中最左边的曲线即对应为不同距离单元的近程杂波。可见,远距离杂波随距离缓慢变化,且距离越远变化越慢。

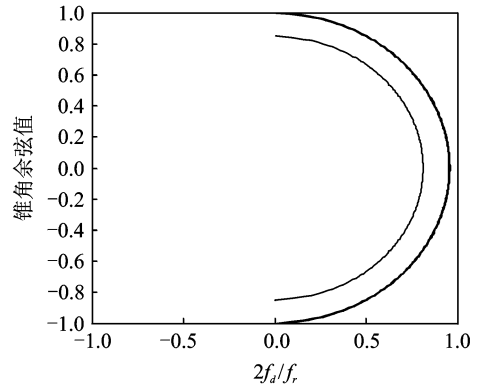


图 2 前视阵角度-多普勒谱

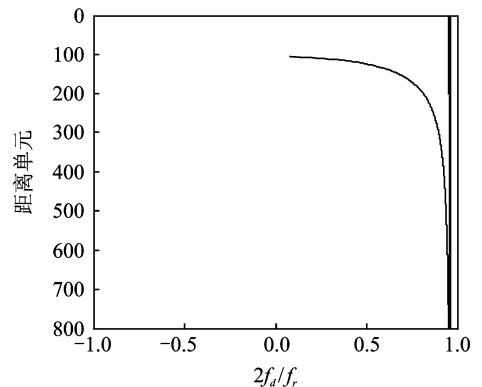


图 3 前视阵距离-多普勒谱

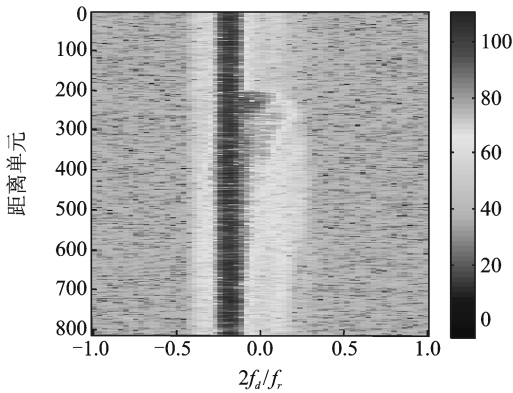
当前技术条件下,相控阵天线的俯仰副瓣很难做得很低,近程杂波功率大且非平稳性强。针对机载数字阵雷达,作者研究了空域俯仰滤波抑制近程杂波的思想,理想条件下可根据雷达参数分别计算各距离单元俯仰空域滤波器的权系数^[4]。但由于

载机高度、阵元幅相等误差影响,计算的俯仰滤波器凹口会与近程杂波失配。文献[5]在此基础上进一步研究了俯仰空域自适应算法,其原理是通过空域俯仰自适应波束形成(ADBFB)来实现近程杂波抑制,即^[5]

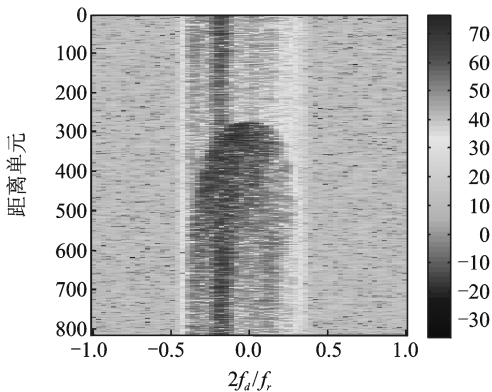
$$\begin{cases} \min \mathbf{W}_l^H \mathbf{R}_l \mathbf{W}_l \\ \text{s. t. } \mathbf{W}_l^H \mathbf{C} = \mathbf{F}^H \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathbf{W}_l 为天线俯仰自适应权系数; \mathbf{R}_l 为利用邻近距离单元和多普勒单元估计的包含近程杂波信息的协方差矩阵; \mathbf{C} 为约束矩阵用于形成俯仰主波束; \mathbf{F} 为常数矢量,一般为全1矢量。自适应权值 $\mathbf{W}_l = \mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{C} (\mathbf{C}^H \mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{F}$ 。

俯仰全空域自适应处理的系统自由度为俯仰天线阵元数。阵元个数越多算法收敛速度越慢,相应所需的IID训练样本数就越多。因此,协方差矩阵 \mathbf{R}_l 采用近程杂波支撑区间内的不同多普勒单元进行估计^[5],但距离模糊下,选取的多普勒单元除了近程杂波信息外还包含了远程杂波信号。图4分别给出了和波束和单个阵元接收杂波的距离-多普勒谱。阵元天线方向图与和波束相比,方位和俯仰副瓣电平更高,远程杂波(对应图中的灰白色区域)与近程杂波在支撑区内的混叠现象更加明显。



(a) 和波束



(b) 单个阵元

图4 杂波距离-多普勒谱

远程杂波其俯仰维空域导引矢量与约束矩阵 \mathbf{C} 中的俯仰主波束方向是一致的,此时远程杂波即为目标信号。假定近程杂波俯仰空域导引矢量为 \mathbf{S}_1 ,远程杂波俯仰导引矢量为 \mathbf{S}_2 。估计的 \mathbf{R}_l 为

$$\mathbf{R}_l = \sigma_1^2 \mathbf{S}_1 \mathbf{S}_1^H + \sigma_2^2 \mathbf{S}_2 \mathbf{S}_2^H + \sigma_N^2 \mathbf{I} \quad (3)$$

式中: σ_1^2 , σ_2^2 和 σ_N^2 分别对应近程杂波、远程杂波和系统噪声的功率; \mathbf{I} 为单位矩阵。自适应计算权值为

$$\mathbf{W}_l = \mu \mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{S}_2 \quad (4)$$

由于近程杂波与远程杂波空域入射角不同, \mathbf{S}_1 与 \mathbf{S}_2 互不相关, \mathbf{W}_l 可近似为

$$\mathbf{W}_l = \mu (\mathbf{I} - \mathbf{S}_1 \mathbf{S}_1^H - \mathbf{S}_2 \mathbf{S}_2^H) \mathbf{S}_2 \quad (5)$$

可见,近程杂波信号 \mathbf{S}_1 与远程杂波信号 \mathbf{S}_2 均有 $\mathbf{S}_1^H \mathbf{W}_l \approx \mathbf{S}_2^H \mathbf{W}_l \approx 0$ 。因此,由包含远程杂波信号的训练样本估计近程杂波协方差矩阵 \mathbf{R}_l 会引起信号相消,严重时计算得到的自适应权值 \mathbf{W}_l 会使俯仰主波束产生畸变。

雷达仿真参数如表1所示^[5]。图5给出了俯仰常规合成和波束和不同距离段俯仰自适应权值的空域响应图。可见,自适应权值在近程杂波处都形成了深凹口对其进行抑制,但俯仰主波束也产生了畸变,这是因为俯仰空域自适应算法^[5]的性能局限,导致后续STAP处理性能下降。具体量化分析见仿真计算。

表1 雷达系统参数

参数名称	参数数值
脉冲重复频率/Hz	5 000
采样带宽/MHz	5
行数	8
列数	64
载机速度/(m·s ⁻¹)	150
CPI内脉冲个数	64
载机飞行高度/m	8 000
阵元间距与波长比值	1/2

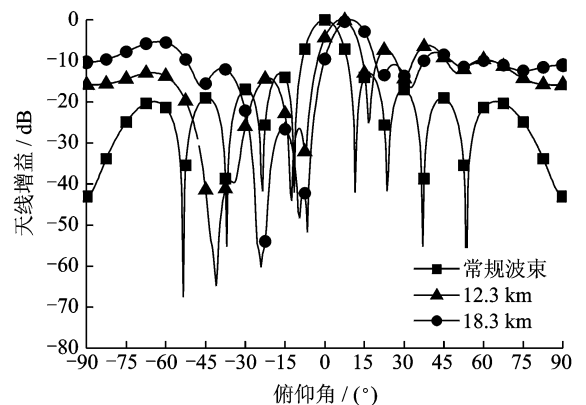


图5 俯仰和波束方向图

2 近程杂波高效自适应抑制算法

近程杂波高效自适应抑制算法是对俯仰空域自适应算法的改进,通过优化训练样本选取和俯仰空域降维,改善近程杂波抑制后俯仰主波束的保形性能并显著降低运算量。本文方案包含以下 3 个步骤:(1) 训练样本选取;(2) 俯仰空域降维;(3) 近程杂波抑制。

2.1 训练样本选取

前述的分析表明,训练样本中的远程杂波是导致自适应俯仰波束产生畸变的原因,因此这里首先研究训练样本选取策略。如果俯仰空域自适应处理的训练样本中不包含主杂波分量,即只包含近程杂波分量,则自适应权值 \mathbf{W}_l 不仅能有效抑制近程杂波,同时俯仰主波束的保形性能也将大大改善。

机载 PD 雷达每次相干积累时间(CPI)内前几个接收脉冲由于远程信号(目标与杂波)尚未返回,一般作为填零脉冲。如果以填零脉冲作为训练样本估计协方差矩阵 \mathbf{R}_l ,则能有效避免远程杂波引起的信号相消。在雷达仿真参数 PRF 为 $f_r = 5\ 000\ \text{Hz}$ 时,第 1 个填零脉冲对应的最远距离为 30 km,与俯仰主波束还有 20° 的偏差。因此,利用第一个填零脉冲来估计近程杂波协方差矩阵 \mathbf{R}_l ,就能在抑制近程杂波的同时改善俯仰主波束的保形性。

采用第一个填零脉冲估计近程杂波信息,与文献[5]相比,训练样本数就大大减少了。近程杂波随距离快速变化的非平稳特性要求不能采用过多的距离单元来估计协方差矩阵 \mathbf{R}_l 。因此,需进一步研究俯仰空域降维方案,以提高收敛速度,降低训练样本数。

2.2 俯仰空域降维

采用第一个填零脉冲估计协方差矩阵 \mathbf{R}_l ,每个距离单元都只有近程杂波信息。对邻近的若干距离单元,其近程杂波空域俯仰角近似相同,并与俯仰主波束存在较大的角度间隔,因此仅需两个自由度就能很好地对其进行抑制^[2]。对相控阵天线,逐列分别进行处理。如图 6 所示,每一列俯仰线阵分别降维形成俯仰和波束与俯仰差波束,即

$$\begin{aligned}\Sigma_E(t) &= \sum_{i=1}^M A_i(t) \\ \Delta_E(t) &= \sum_{i=1}^{M/2} A_i(t) - \sum_{i=M/2+1}^M A_i(t)\end{aligned}\quad (6)$$

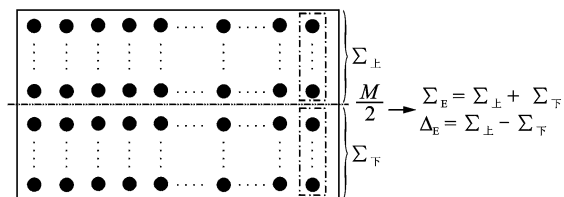


图 6 俯仰空域降维示例

式中: $A_i(t)$ 为第 i 个阵元在时刻 t 的输出信号; M 为俯仰阵元个数。俯仰降维等效为俯仰线阵输出信号与降维矩阵 \mathbf{T} 的乘积,即

$$\begin{bmatrix} \Sigma_E(t) \\ \Delta_E(t) \end{bmatrix} = \mathbf{T}^H \mathbf{S}(t), \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ \cdots & \cdots \\ 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}_{M \times 2} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{S}(t)$ 为俯仰线阵在时刻 t 的输出信号,为 $M \times 1$ 的矢量。

经俯仰空域降维后,利用每一列形成的俯仰和、差波束进行近程杂波抑制。与俯仰空域自适应处理算法相比,此时空域自由度锐减为 2,根据 RMB 准则^[3],理论上只需 4 个 IID 样本就能将性能损失限制在 3 dB 内。

2.3 近程杂波抑制

根据前述分析,以第一个填零脉冲为训练样本,在俯仰维逐列采用降维形成的俯仰和、差波束进行近程杂波抑制。根据旁瓣相消(SLC)原理,可用差波束对消和波束中的近程杂波,自适应权值 \mathbf{W}_E 满足^[5]

$$\begin{aligned}\min E[(\Sigma_E(t) - \mathbf{W}_E \Delta_E(t)) \\ (\Sigma_E(t) - \mathbf{W}_E \Delta_E(t))]^H\end{aligned}\quad (8)$$

与俯仰全空域自适应处理算法相比,本文方案进一步规避了俯仰空域导引矢量的误差。

由式(7,8),每一列俯仰线阵实现近程杂波抑制的自适应权值为

$$\mathbf{W}_l = \mathbf{T} \begin{bmatrix} 1 \\ -\mathbf{W}_E \end{bmatrix} \quad (9)$$

因此在每一次 CPI 内,每一列俯仰线阵逐脉冲采用 \mathbf{W}_l 进行滤波,就能有效抑制回波信号中的近程杂波,同时避免远程目标信号受到损失。

经本文方案俯仰滤波后,天线阵面等价形成了一个方位线阵。由于已滤去了近程杂波分量,提高了杂波的平稳性,后续 STAP 处理的性能将得到改善。

3 性能分析

仿真参数同表1,图7为本文方案自适应权值的空域响应图。自适应权值在近程杂波对应的俯仰角形成了深凹口,且俯仰主波束与常规形成主波束性能基本一致。与俯仰空域自适应处理算法相比(见图5),有效避免了目标信号的信噪比损失。图8为逐脉冲进行近程杂波抑制后的杂波距离-多普勒图。可见,在高度线后的近程杂波被抑制到噪声量级。

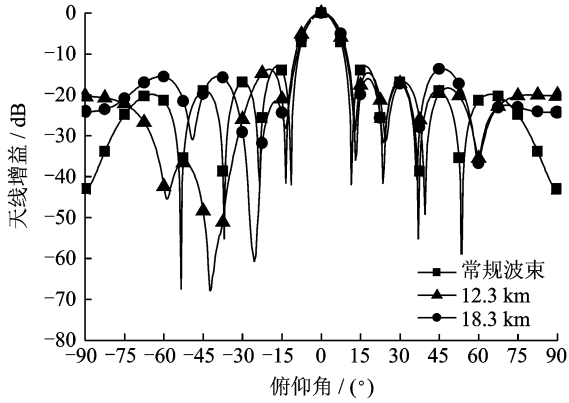


图7 俯仰和波束方向图

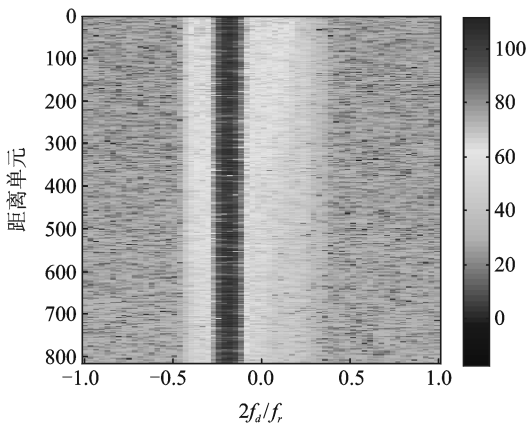
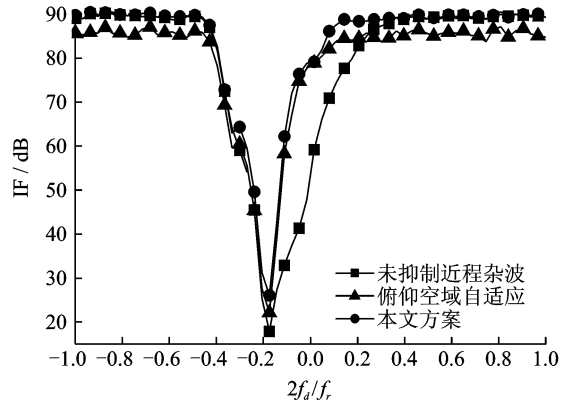


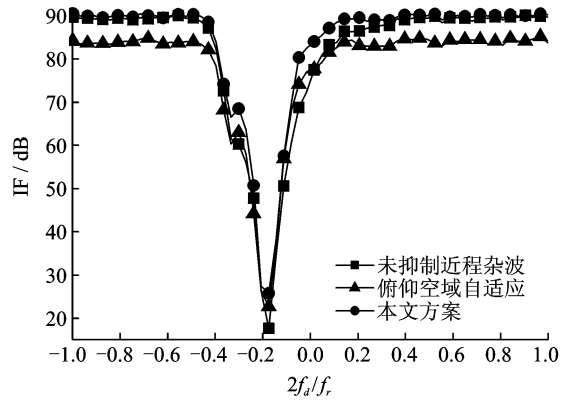
图8 杂波距离-多普勒谱

以 STAP 处理后的改善因子(IF)来量化分析不同算法的性能。图9分别给出了未抑制近程杂波(常规 STAP)、俯仰空域自适应算法^[5]和本文方案处理后的 STAP 改善因子曲线,其中方位 STAP 均采用 16 子阵 3DT 算法,本文不再赘述。近程杂波区,后两种算法的 IF 较常规 STAP 均有显著提高,其中在第 400 个距离单元段,近程杂波强度高,变化快,性能改善尤其明显。俯仰空域自适应处理算法 IF 提高了约 11.2 dB,本文算法提高了约 15.5 dB。在远程杂波和噪声区,本文算法与常规

STAP 处理性能一致。而俯仰空域自适应算法由于信号相消,导致俯仰主波束增益下降,IF 有损失。在仿真参数下,与本文算法相比,在第 400 距离单元段 IF 下降了约 4.4 dB;在第 600 距离单元段 IF 损失约 6.2 dB。



(a) 第400个距离单元段



(b) 第600个距离单元段

图9 STAP 改善因子

此外,本文算法的空域自适应处理维数仅为 2,在提高收敛速度的同时也进一步降低了运算量。在仿真参数下,俯仰空域自适应算法与本文方案均选用相同距离单元进行协方差矩阵估计,系统运算量由 $O(M^3 + M^2)$ 锐减为 $O(2^3 + 2^2)$ 。当俯仰阵元数增加时,本文算法的运算量降低将更显著。

4 结束语

本文针对机载雷达近程杂波产生机理,结合雷达系统设计,给出了一种收敛速度快、运算量小的高效自适应处理方案。该方案在每个 CPI 内以仅包含近程杂波的第一个填零脉冲为训练样本,有效避免了远程主杂波引起的俯仰向信号相消。同时,对俯仰阵元逐列进行空域降维,利用降维后的俯仰和差波束进行近程杂波自适应抑制。仿真参数下

与俯仰全空域自适应处理相比,本文算法在第400个和600个距离单元,STAP处理后的改善因子即输出信噪比分别提高了约4.6和6.4 dB,且运算量由 $O(M^3+M^2)$ 锐减为 $O(2^3+2^2)$ 。因此,本文方案更易于工程实施。

参考文献:

- [1] Brennan L E, Mallet J D, Reed I S. Theory of adaptive radar[J]. IEEE Trans on AES, 1973, 9(2): 237-251.
- [2] 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 Yongliang, Peng Yingning. Space time adaptive signal processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [3] Reed I S, Mallett J D, Brennan L E. Rapid convergence rate in adaptive arrays[J]. IEEE Trans AES, 1974, 10(6): 853-863.
- [4] 孟祥东. 空时二维自适应信号处理与动目标检测[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.
Meng Xiangdong. Space-time adaptive processing and moving target indication[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- [5] 孟祥东,王彤,吴建新,等. 机载相控阵雷达近程杂波抑制的俯仰向空域自适应算法[M]. 电子与信息学报, 2010, 32(4): 948-952.
Meng Xiangdong, Wang Tong, Wu Jianxin, et al. Elevation adaptive algorithm for short-range clutter suppression in airborne phased array radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(4):948-952.
- [6] 沈明威. 机载雷达空时处理动目标检测技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
Shen Mingwei. Study on $\Sigma\Delta$ -beam space-time processing techniques for moving target detection[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [7] Kreyenkamp O, Klemm R. Doppler compensation in forward-looking STAP radar[J]. IEE Proceedings-Radar Sonar and Navigation. 2001,148(5): 253-258.
- [8] Braham Hamed, Zhang Yuhong, Abdelhak Hajjari. STAP with angle-Doppler compensation for bistatic airborne radars[C]// Proceedings of the IEEE Radar Conference. Long Beach, CA, USA: [s. n.], 2002: 311-317.
- [9] Zatman M. Circular array STAP[J]. IEEE Trans on AES, 2000, 36(2): 510-517.
- [10] Braham H, Michel J H, Zhang Y H. Bistatic STAP performance analysis in radar applications[C]// Proceedings of the IEEE National Radar Conference. Atlanta, GA, USA: [s. n.], 2001: 198-203.
- [11] Lapierre F D, Verly J G, Van Droogenbroeck. New solutions to the problem of range dependence in bistatic STAP radars[C]// Proceedings of the IEEE International Radar Conference. Piscataway NJ, USA: [s. n.], 2003: 452-459.
- [12] Xie W C, Wang Y L. New solution to range-dependence problem in STAP radar with HPRF[C]// IEEE 2007 Radar Conference. Boston, MA: [s. n.], 2007: 562-567.
- [13] Colone F. Spectral slope-based approach for mitigating bistatic space-time adaptive processing clutter dispersion [J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2011, 5(5):593-603.

