

均匀圆形阵列基于指数形式导数更新的 STAP 算法

赵军^{1,3} 沈明威² 朱岱寅¹

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016; 2. 河海大学计算机与信息学院, 南京, 211100; 3. 空军第一航空学院, 信阳, 464000)

摘要: 机载相控阵雷达采用均匀圆形阵列天线具有全方位扫描、同时实现仰俯-方位角估计和天线方向图好等优点; 但圆形天线特殊的几何结构使得其各距离单元回波不是独立同分布的样本, 造成了空时自适应处理技术性能急剧下降。本文提出了一种基于指数形式导数更新(Exponent derivative based updating, EDBU)的杂波抑制方法, 该方法通过对样本数据进行指数形式扩展, 减小均匀圆形天线机载雷达杂波的非均匀程度, 提高统计型空时自适应处理(Space time adaptive processing, STAP)处理器的性能。仿真结果表明, 该方法不仅明显好于局域处理和杂波距离依赖性补偿算法, 而且也优于传统的基于导数更新法。

关键词: 均匀圆形阵列; 指数函数; 基于导数更新; 杂波抑制; 空时自适应处理

中图分类号: TN951 **文献标志码:** A

Exponent-Derivative-Based Updating STAP Method for Uniform Circular Array

Zhao Jun^{1,3}, Shen Mingwei², Zhu Daiyin¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. College of Computer & Information, Hohai University, Nanjing, 211100, China; 3. The First Aeronautical Institute of Air force, Xinyang, 464000, China)

Abstract: Airborne radar with uniform circular array (UCA) antennas has the merits of all-orientation space scanning, joint elevation-azimuth estimation, and good beamform when the beam center deviates from the normal of the array. But the clutter distribution of UCA varied with ranges and received data in different range cells are not independently identically distributed (IID) samples for its geometry specialty, which results in the significant degradation in traditional space time adaptive processing (STAP) method. A new STAP method, namely exponent derivative based updating algorithm, is proposed. In the method, the change of adaptive weight is supposed as an exponential function and the range-dependency of UCA can be effectively reduced by extending the received data vectors. Simulation results verify that the proposed method outperforms significantly both localized processing and range-dependency compensation methods, as well as the traditional derivative-based updating algorithm.

Key words: uniform circular array; exponential function; derivative based updating; clutter suppression; space time adaptive processing

引言

机载相控阵雷达研发受到世界上越来越多国家的高度关注,相控阵天线技术已用于许多国家的新一代机载预警雷达和机载火控雷达,其重要原因之一就是在相控阵体制下可以采用先进的空时自适应处理(Space time adaptive processing, STAP)技术来改善对杂波和干扰的抑制,从而使机载雷达具有更加优越的性能。目前对 STAP 的研究主要针对均匀线性阵列天线,与其相比,机载雷达采用均匀圆形阵列(Uniform circular array, UCA)天线,具有能实现方位 360° 扫描、可以同时估计信号的仰俯角和方位角以及天线波束方向性好等优点。在火控雷达系统中,可以做到与载机共形,不仅减少了对飞机气动性的影响,而且可以减小雷达散射面积(Radar cross section, RCS),提高载机的隐身能力。但由于圆形天线的阵列流型比线性阵列复杂得多,各距离单元杂波的分布随距离变化而变化,杂波在距离向是非均匀的,基于线性阵列的 STAP 技术大都不能直接用于圆形阵列,因此,对于均匀圆形阵列 STAP 问题的研究是 STAP 技术应用的难点之一^[1,2]。

目前,减小距离依赖性引起的杂波非均匀 STAP 技术可以分为 3 类:(1)局域处理技术^[3-5],该方法仅取少量样本作为训练样本,通过样本数量减少换取杂波的非均匀程度降低,但统计型 STAP 算法要求训练样本数为杂波自由度的 2~5 倍时,才能实现有效估计,降低非均匀程度与精确估计杂波协方差矩阵的矛盾使得这类方法性能较差。(2)杂波补偿技术,该技术通过杂波平移,使各距离单元杂波谱在这一点重合,通过提高杂波相似程度减少杂波的非均匀,代表性算法主要有多普勒频移(Doppler warping, DW)法^[6]、角度-多普勒补偿(Angle Doppler compensation, ADC)法^[7,8]及其改进算法(Adaptive ADC, A2DC)法^[9,10]和空时联合插值法^[11,12]。但杂波来自空间不同方向,补偿处理仅对某一方向的杂波进行对齐,在剩余方向上的非均匀并未改善。(3)基于导数更新(Derivative based updating, DBU)技术^[13,14],该方法通过线性展开,将空时处理器权矢量近似为距离的线性函数,实现较为简单。但该方法的假设前提是杂波在各距离单元之间的变化速度相同,这与杂波分布的真实情况不符,因而性能较差。本文研究了均匀圆形阵列天线机载雷达 STAP 技术,提出一种基于指数形式导数更新(Exponent DBU, EDBU)的杂波抑制方法,该方法通过对杂波样本做指数形式的更新,有效减小杂波非均匀程度,提高统计型 STAP 算法的杂波抑制性能。

1 圆形阵列天线机载雷达杂波特性

假定圆形天线机载雷达模型如图 1 所示。载机沿 Y 轴正向以速度 v 匀速飞行。 θ 和 φ 分别为地面杂波散射单元相对于载机的仰俯角和方位角。 P 元阵列天线均匀分布在半径为 R 的圆周上,任一工作时刻选取圆周上的 N 个相邻阵元进行波束扫描(例如阵元 $1 \sim N$),在下一工作时刻,通过相控阵天线技术实现阵元选择,去掉第 1 个阵元,接入第 $N+1$ 个阵元,以此类推,实现方位 360° 扫描^[15]。

对于某一固定单元,设相干处理脉冲数为 K ,将一个脉冲间隔内全部 N 个阵元接收数据表示为 $NK \times 1$ 维矢量^[16],有

$$\mathbf{X} = \frac{g_n(\varphi)}{R^2} \int_0^\pi F(\theta, \varphi) \mathbf{S}_t(f_d) \otimes \mathbf{S}_s(\varphi) d\varphi + \mathbf{n}' \quad (1)$$

式中: $F(\theta, \varphi)$ 为发射天线方向图; $g_n(\varphi)$ 为第 n 个接收通道接收方向图; R_s 为该距离单元的雷达斜距; $\mathbf{S}_t(f_d) = [1, e^{j2\pi \frac{f_d}{f_r} \cos\theta \cos\varphi}, \dots, e^{j2\pi(K-1) \frac{f_d}{f_r} \cos\theta \cos\varphi}]^T$ 为 $K \times 1$ 时域导向

矢量, $f_d = \frac{2v}{\lambda}$, λ 为雷达工作波长; f_r 为脉冲重复频率; $\mathbf{S}_s(\varphi) = [e^{j\omega_s 1} \quad e^{j\omega_s 2} \quad \dots \quad e^{j\omega_s N}]^T$ 为 $N \times 1$ 维空域

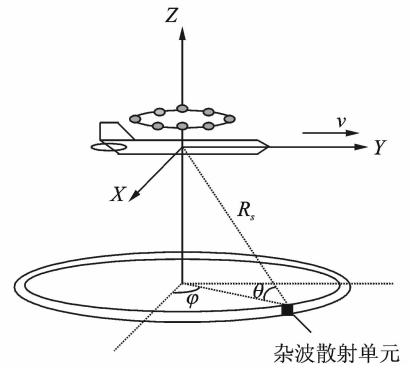


图 1 均匀圆形阵列天线几何结构图
Fig. 1 Geometry of airborne radar with UCA

导向矢量, $\omega_{sn} = 2\pi \frac{R}{\lambda} \cos\theta \cos(\varphi - \varphi_n)$, $\varphi_n = 2\pi(n-1)/P$ 为第 n 个阵元的方位角, \mathbf{n}' 为 $NK \times 1$ 维高斯噪声, “ \otimes ” 为 Kroncker 内积。STAP 处理器的权矢量为

$$\mathbf{W} = \mu \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S} \tag{2}$$

式中: $\mathbf{R} = E[\mathbf{X}\mathbf{X}^H]$ 为杂波与噪声的协方差矩阵, $\mathbf{S} = \mathbf{S}_i \otimes \mathbf{S}_s$ 为目标信号的导向矢量, $\mu = \mathbf{S}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}$ 为常数。假定载机高度 $H = 8$ km, 分别取雷达斜距为 10, 15, 20, 50, 100 和 400 km, 分别得到圆形阵列天线机载雷达杂波功率谱和杂波特征谱^[16] 如图 2, 3 所示。

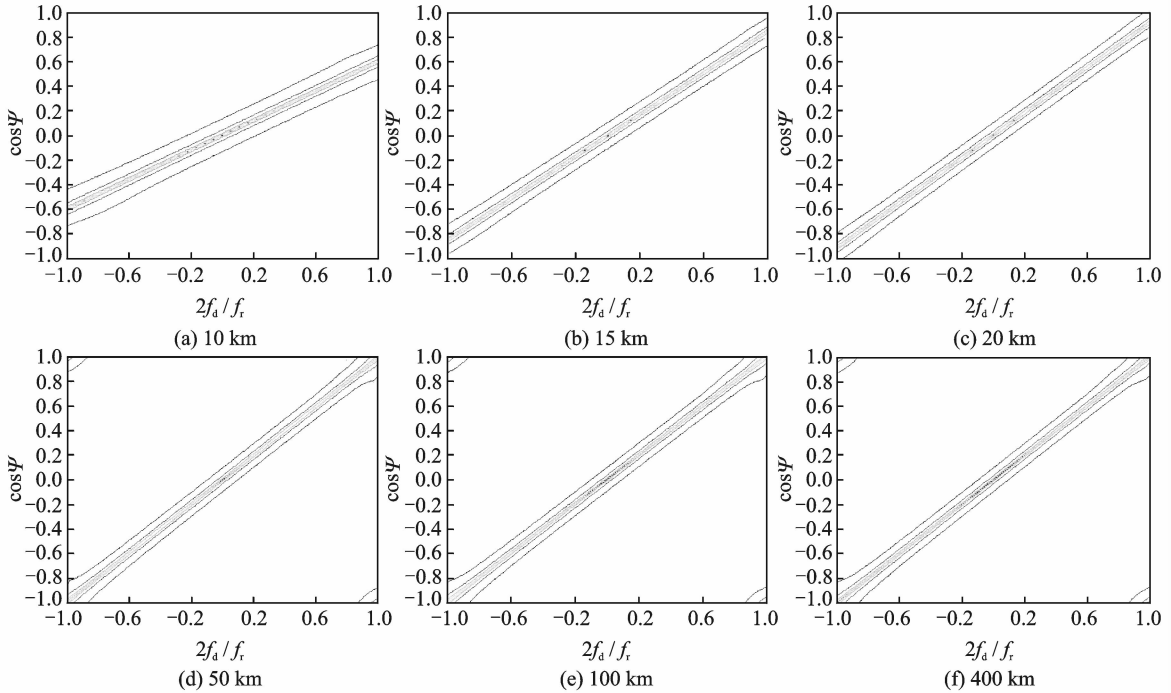


图 2 圆形阵列天线杂波谱距离向分布特性

Fig. 2 Clutter spectrum comparison of UCA in different distance

比较图 2 和图 3 可以看出, 与线性阵列不同, 圆形阵列天线的杂波谱和杂波特征谱都随距离改变而不断变化, 这种变化在近程较快, 在远程较慢。各距离单元的杂波不满足独立同分布 (Independently identically distributed, IID) 条件, 由于统计型 STAP 算法要求有足够多的 IID 样本才能有效估计待检测单元的协方差矩阵^[17], IID 样本数不足将导致圆形阵列天线 STAP 处理器的杂波抑制性能, 特别是近程杂波抑制性能急剧下降。

2 基于导数更新法

DBU 算法^[13, 14] 认为 STAP 处理器的权矢量 \mathbf{W} 为距离单元数 l 的一次函数, 若假定第 0 单元为待检测单元, 第 l 个距离单元的权矢量 $\mathbf{W}(l)$ 可表示为

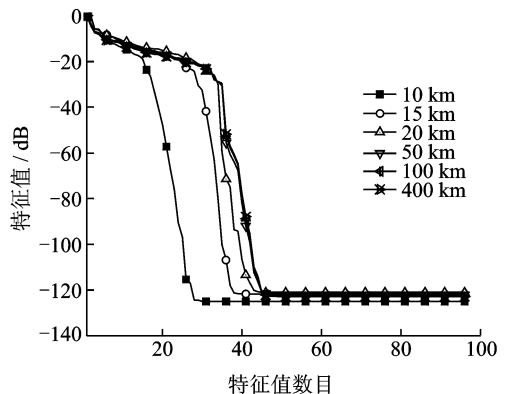


图 3 均匀圆形阵列杂波特征谱距离向分布特性
Fig. 3 Comparison of eigenvalues distribution of UCA in different distance

$$\mathbf{W}(l) = \mathbf{W}(0) + l\dot{\mathbf{W}}(0) \quad (3)$$

式中: $\dot{\mathbf{W}}(0)$ 为 $\mathbf{W}(0)$ 的一阶导数, $\mathbf{W}(0)$ 为第 0 单元的权矢量, $l = -L, \dots, -1, 0, 1, \dots, L$ 。训练样本总数为 $2L$ 。第 l 个单元的输出为

$$Y(l) = \mathbf{W}^H(l)\mathbf{X}(l) = \bar{\mathbf{W}}^H(0)\bar{\mathbf{X}}(l) \quad (4)$$

式中: $\bar{\mathbf{W}}(0) = [\mathbf{W}^T(0) \quad \dot{\mathbf{W}}^T(0)]^T$, $\bar{\mathbf{X}}(l) = [\mathbf{X}^T(l) \quad l\mathbf{X}^T(l)]^T$ 。

由式(4)可以看出, 变换后的权矢量变成了 $\bar{\mathbf{W}}(0)$, 它与距离单元数 l 无关, 权矢量随距离的变化关系转移到扩展后的样本数据 $\bar{\mathbf{X}}(l)$, 经扩展后杂波非均匀性得到有效改善, 各距离单元样本数据满足 IID 条件, 因此由各距离单元平均而得到的权矢量也相同。

3 基于指数形式导数更新法

DBU 算法中假定 STAP 处理器的权矢量 $\mathbf{W}(l) = \mathbf{W}(0) + l\dot{\mathbf{W}}(0)$, 这表明权矢量 $\mathbf{W}(l)$ 随距离单元数 l 的变化而变化, 并且在各距离单元之间变化的速度相同, 显然这个结论不准确。由第 1 节分析可知, 圆形阵列天线的杂波分布在不同距离单元间变化的速度不同, 在近程单元间变化剧烈, 在远程单元间变化平缓, 究其根本原因, 是电磁波在大气传输中的衰减造成的, 由于雷达工作时的传播衰减满足负指数函数规律, $f(x) = e^{-\alpha x}$ ($\alpha > 0$), 式中 α 为衰减系数, 它与大气的吸收和散射特性有关, x 为电磁波的传播距离^[17], 如图 4 所示。根据以上分析, 提出一种基于指数形式导数更新 (Exponent DBU, EDBU) 算法。在 EDBU 算法中权矢量不是距离单元数 l 的线性函数, 而是 l 的指数函数, 满足

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}(e^{-al}) \quad (5)$$

式中 $\alpha > 0$ 。 $\mathbf{W}(e^{-al})$ 的 Taylor 展开式为

$$\mathbf{W}(e^{-al}) = \mathbf{W}(0) + (e^{-al} - 1)\dot{\mathbf{W}}(0) + \frac{(e^{-al} - 1)^2}{2!}\ddot{\mathbf{W}}(0) + \dots \quad (6)$$

当 l 很小时, 忽略二次及其以上项, 式(6)可以近似为

$$\mathbf{W}(e^{-al}) \approx \mathbf{W}(0) + (e^{-al} - 1)\dot{\mathbf{W}}(0) \quad (7)$$

第 l 个单元的输出为

$$Y(l) = \mathbf{W}^H(e^{-al})\mathbf{X}(l) = \mathbf{W}^H(0)\mathbf{X}(l) + (e^{-al} - 1)\dot{\mathbf{W}}^H(0)\mathbf{X}(l) = \begin{bmatrix} \mathbf{W}(0) \\ \dot{\mathbf{W}}(0) \end{bmatrix}^H \begin{bmatrix} \mathbf{X}(l) \\ (e^{-al} - 1)\mathbf{X}(l) \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{W}}_e^H(0)\bar{\mathbf{X}}_e(l) \quad (8)$$

式中: $\bar{\mathbf{W}}_e(0) = \begin{bmatrix} \mathbf{W}(0) \\ \dot{\mathbf{W}}(0) \end{bmatrix}$ 为经过扩展后的权矢量, $\bar{\mathbf{X}}_e(l) = \begin{bmatrix} \mathbf{X}(l) \\ (e^{-al} - 1)\mathbf{X}(l) \end{bmatrix}$ 为扩展样本数据。对应的杂波协方差矩阵为

$$\bar{\mathbf{R}}_e = \sum_{l=-L, l \neq 0}^L \bar{\mathbf{X}}_e(l)\bar{\mathbf{X}}_e^H(l) \quad (9)$$

STAP 处理器的最优权矢量为

$$\bar{\mathbf{W}}_e = \bar{\mu}_e \bar{\mathbf{R}}_e^{-1} \bar{\mathbf{S}}_e \quad (10)$$

式中: $\bar{\mathbf{S}}_e = [\mathbf{S}^T \quad 0]^T$ 为经过扩展后的目标信号, 其维数等于 $2NK \times 1$, $\bar{\mu}_e = \bar{\mathbf{S}}_e^H \bar{\mathbf{R}}_e^{-1} \bar{\mathbf{S}}_e$ 为常数, 则

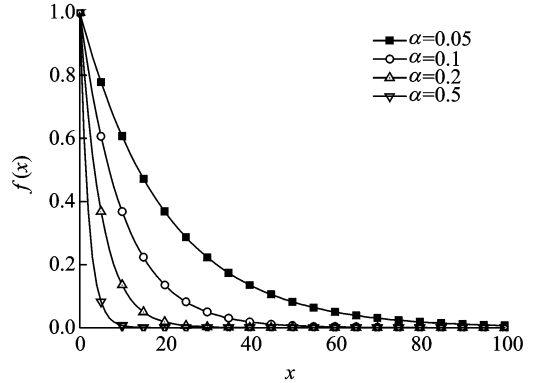


图 4 指数函数与参数 α 关系图

Fig. 4 Exponent functions with parameter α

$$\bar{\mathbf{X}}_e(l) = [\mathbf{X}^T(l) \quad \mu_e(e^{-\alpha l} - 1)\mathbf{X}^T(l)]^T \tag{11}$$

μ_e 为归一化系数,满足

$$\frac{1}{2L} \sum_{l=-L, l \neq 0}^{L} \mu_e^2 (e^{-\alpha l} - 1)^2 = 1 \tag{12}$$

由于 EDBU 算法需要对样本进行扩展,将数据的维数加倍,相应的 STAP 处理器所需训练样本数目也增加 1 倍,计算量增加 8 倍^[16],为减少运算量和训练样本数目,可采用三多普勒通道先时后空自适应处理(3 Doppler time space adaptive processing, 3DT-SAP)^[3,16]的方法进行降维处理。降维 EDBU 算法步骤可以归纳如下:(1)确定样本数目,选取训练样本 $\mathbf{X}(l)$ 。(2)将样本进行指数扩展,得到扩展后的样本数据 $\bar{\mathbf{X}}_e(l)$ 。(3)用 3DT-SAP 算法对扩展后的样本数据 $\bar{\mathbf{X}}_e(l)$ 降维处理,得到杂波协方差矩阵 $\bar{\mathbf{R}}_e$ 。(4)计算自适应的权向量 $\bar{\mathbf{W}}_e$ 并作用于待检测单元,得到输出。

4 仿真结果

仿真参数如表 1 所示,其中 CNR 为杂声噪声比。假定待检测单元雷达斜距 $R_s = 12$ km,各算法均采用 3DT-SAP 算法进行降维处理,训练样本数 $2L = 72$ 。由图 3 知,当 $H = 8\ 000$ m 时,雷达斜距 $R_s = 50$ km 时,杂波趋于稳定,对照图 4,取 $\alpha = 0.1$ 最接近杂波分布特性。图 5 给出了最优处理器、EDBU 法、DBU 法、局域补偿算法(选用 ADC 法)和局域处理算法(选用 3DT-SAP 法)杂波谱的空时分布比较图,图中黑色部分为杂波谱,图 6 给出了 4 种算法改善因子比较图。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation Parameters

| | |
|---------------------------|-------------|
| 载机速度 $v/(m \cdot s^{-1})$ | 130 |
| 载机高度 H/m | 8 000 |
| 雷达工作波长 λ/m | 0.23 |
| 脉冲重复频率 f_r/Hz | 2 260 |
| 阵元总数 P | 36 |
| 工作阵元数目 N | 12 |
| 相干处理脉冲数 K | 8 |
| 相邻阵元间距 d | $\lambda/2$ |
| 距离环宽度 $\Delta R/m$ | 75 |
| 单元输入杂噪比 CNR/dB | 50 |

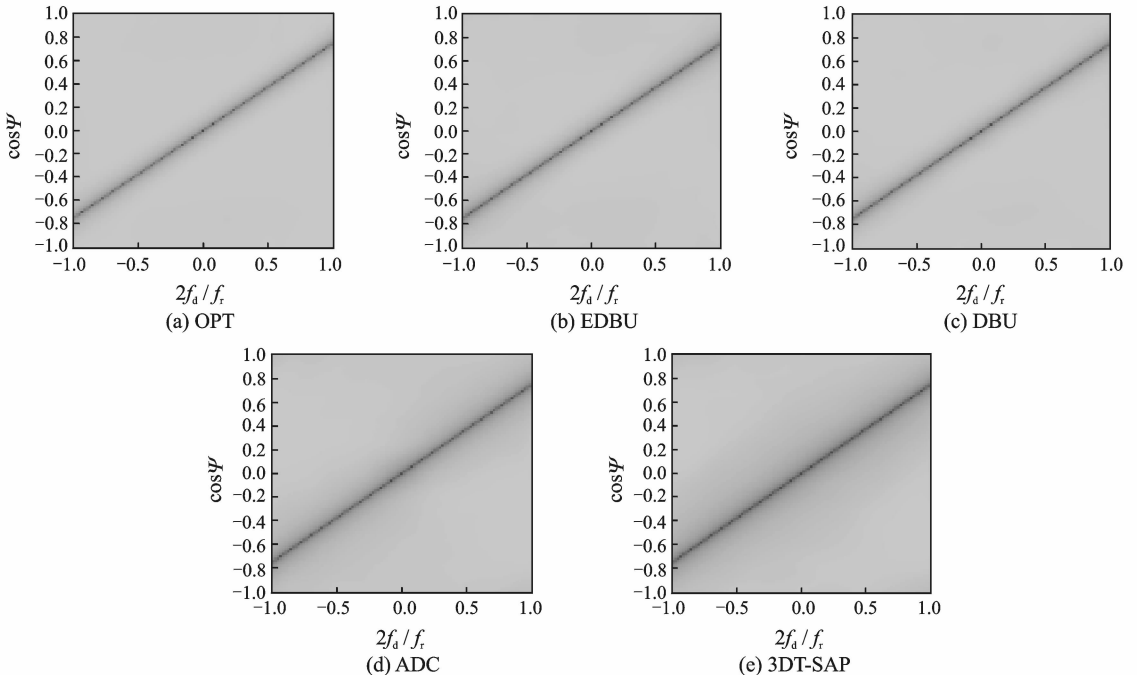


图 5 圆形阵列天线 STAP 算法杂波谱比较

Fig. 5 Clutter spectrum comparison of STAP methods for UCA

由图 5 和图 6 可以看出, 均匀圆形阵列 STAP 算法的杂波抑制性能从高到低依次为 EDBU 法、DBU 法、ADC 法和 3DT 法, 因为 3DT-SAP 法只是减少了训练样本数目, 并未降低杂波非均匀程度, ADC 法在主波束方向上对杂波非均匀进行了补偿, 但在旁瓣方向仍然存在着杂波非均匀, 而 EDBU 法和 DBU 法通过对样本数据扩展, 在各个方位对杂波非均匀都进行了补偿, 因而性能最好。进一步比较图 5(b, c) 发现, EDBU 算法的杂波谱比 DBU 法更“窄”。由图 6 可以看出, 其改善因子也略高于 DBU 法, 接近最优处理器, 因为 EDBU 法假设权矢量服从负指数分布, 与 DBU 法相比, 其权矢量更符合杂波的真实分布情况, EDBU 法的改善因子平均比 DBU 法好约 0.53 dB, 比 ADC 法好约 3.33 dB, 比 3DT-SAP 法好 5.62 dB, 而训练样本数目和运算量与 DBU 法完全相同, 但付出的代价是运算量的增加, EDBU 算法的运算量约为 9.00×10^6 复乘运算, 与 DBU 算法相同, 略高于 ADC 法和 3DT-SAP 法, 表 2, 3 给出了 4 种算法的训练样本数目和运算量比较。

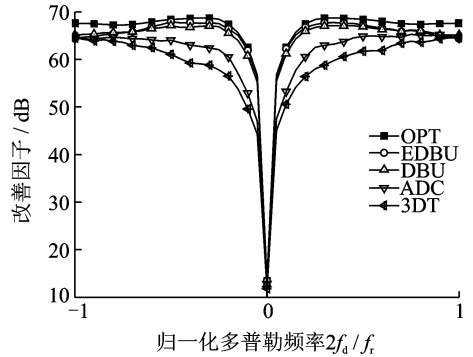


图 6 圆形阵列天线 STAP 算法改善因子比较
Fig. 6 IF Comparison of STAP methods for UCA

表 2 圆形阵列天线 STAP 算法训练样本数目比较

Tab. 2 Comparison of training samples of STAP methods for UCA

| 算 法 | EDBU | DBU | ADC | 3DT-SAP |
|--------|------|-----|-----|---------|
| 训练样本数目 | 144 | 144 | 72 | 72 |

表 3 圆形阵列天线 STAP 算法运算量比较

Tab. 3 Computational complexity comparison of STAP methods for UCA

| 算 法 | 协方差矩阵估计 | 权矢量计算 | 总运算量 |
|---------|------------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| EDBU | $72^2 \times 144 \times 8$ | $72^3 \times 8 + 72^2 \times 8$ | 9.00×10^6 |
| DBU | $72^2 \times 144 \times 8$ | $72^3 \times 8 + 72^2 \times 8$ | 9.00×10^6 |
| ADC | $2 \times 36^2 \times 72 \times 8$ | $36^3 \times 8 + 36^2 \times 8$ | 1.88×10^6 |
| 3DT-SAP | $36^2 \times 72 \times 8$ | $36^3 \times 8 + 36^2 \times 8$ | 1.13×10^6 |

5 结束语

本文研究了一种基于指数形式导数更新的杂波抑制方法——EDBU 法, 该方法针对圆形天线机载雷达杂波距离向变化“先快后慢”的特点通过对训练样本数据进行指数形式扩展, 提高杂波相似程度, 减小杂波非均匀程度, 最后采用 3DT 法处理, 以降低算法量和减小训练样本数目。仿真结果表明, 该算法能有效改善处理器的杂波抑制性能, 滤波器响应和改善因子都比局域处理算法和补偿类算法有明显提高, 也优于 DBU 法, 具有较好的工程应用前景。

参考文献:

- [1] Zatman M. Circular array STAP[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(2): 510-517.
- [2] Dikeman D, Bell K, Moore C A, et al. Real time STAP for UESA radar[C]//Proceedings of IET International Conference on Radar Systems. Edinburgh, UK: [s. n.], 2007: 15-18.

- [3] Di Pietro R. Extended factored space-time processing for airborne radar systems[C]//Proceedings of the 26th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computing. Pacific Grove, CA, USA; [s. n.], 1992:425-430.
- [4] 姜晖, 廖桂生. 一种时域滑窗多普勒后处理的 STAP 方法[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(2):123-130.
Jiang Hui, Liao Guisheng. STAP method after time-delay taps and Doppler filtering[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012, 27(2):123-130.
- [5] 沈明威, 孟祥东, 朱岱寅. 机载雷达近程杂波高效自适应抑制算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(1):88-93.
Shen Mingwei, Meng Xiangdong, Zhu Daiyin. Efficient adaptive algorithm for short-range clutter suppression of airborne radar[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 45(1):88-93.
- [6] Borsari G K. Mitigating effects on STAP processing caused by an inclined array[C]//Proceedings of the IEEE National Radar Conference. Dallas, TX, USA; IEEE, 1998:135-140.
- [7] Himed B, Zhang Y H, Hajjari A. STAP with angle-Doppler compensation for bistatic airborne radar[C]//Proceedings of the IEEE National Radar Conference. Long Beach, CA, USA; IEEE, 2002:311-317.
- [8] Himed B. Effects of bistatic clutter dispersion on STAP system[C]//Proceedings of the IEEE National Radar Conf Long Beach. CA, USA; IEEE, 2002:360-364.
- [9] Melvin W L, Davis M E. Adaptive cancellation method for geometry-induced nonstationary bistatic clutter environments[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(2):651-672.
- [10] Melvin W L, Himed B, Davis M E. Doubly adaptive bistatic clutter filtering[C]//Proceedings of 2003 IEEE Radar Conference. Huntsville, AL; IEEE, 2003:171-178.
- [11] 岳兵, 李明, 廖桂生. 基于空时插值的机载雷达杂波距离依赖性补偿方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 32(8):1557-1561.
Yue Bing, Li Ming, Liao Guisheng. Compensation of clutter range dependence for airborne radar based on space-time interpolation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 32(8):1557-1561.
- [12] Varadarajan V, Krolik J L. Joint space-time interpolation for distorted linear and bistatic array geometries[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(3):848-860.
- [13] Kogon S M, Zatman M. Bistatic STAP for airborne radar systems[C]//Proceedings of the ASAP Workshop. Lexington, MA, USA; MIT Lincoln Laboratory, 2001:1-6.
- [14] 李明, 廖桂生. 利用基于导数更新的双基机载雷达杂波距离依赖性补偿方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(9):2059-2064.
Li Ming, Liao Guisheng. Algorithm utilizing derivative based updating to compensate clutter range dependence for bistatic airborne radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(9):2059-2064.
- [15] 赵军, 朱兆达. 均匀圆形阵列的局域互谱尺度 STAP 算法[J]. 信号处理, 2010, 27(1):60-66.
Zhao Jun, Zhu Zhaoda. A localized cross spectrum metric method for uniform circular array[J]. Signal Processing, 2010, 27(1):60-66.
- [16] 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, 2000:69-72.
Wang Yongliang, Peng Yingning. Space time adaptive processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000:69-72.
- [17] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2000:151-153.
Ding Lufei, Geng Fulu. Radar theory[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000:151-153.

作者简介:



赵军 (1974-), 男, 博士, 博士后, 研究方向: 空时自适应信号处理, E-mail: hapyzj112@163.com.



沈明威 (1981-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 雷达信号处理, E-mail: smw_nuaa@hotmail.com.



朱岱寅 (1974-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 雷达信号处理, E-mail: zhudy@nuaa.edu.cn.

