

改进的机载相控阵雷达 JDL-STAP 算法

陈怀庆¹ 张小贝¹ 方习高² 吴 琛²

(1.上海大学 通信与信息工程学院 上海 200444; 2.上海飞机设计研究院 综合航电系统设计研究部 上海 201210)

摘 要: 机载相控阵雷达在下视工作时受地杂波的影响较大,虽然空时自适应处理(STAP)技术拥有良好的杂波抑制能力,但其性能依赖于大量的训练样本和高运算量,在现实工程中难以应用。为了弥补 STAP 算法的不足之处,提出了一种改进的局域联合处理(JDL)降维算法。该方法在构造降维矩阵时,调整了局域处理单元的选取策略,并在主通道对应的杂波脊处选取了 4 个独立的辅助通道以提高波束的指向性、抵消主波束中的杂波。实验结果表明,改进后算法比传统 JDL 算法拥有更好的杂波抑制性能,并进一步减少了系统计算量,在存在幅相误差的情况下仍能保持较好的稳定性。

关键词: 机载相控阵雷达; STAP; JDL 算法; 降维矩阵; 杂波抑制

中图分类号: TN958.92 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Improved JDL-STAP algorithm for airborne phased array radar

Chen Huaiqing¹ Zhang Xiaobei¹ Fang Xigao² Wu Chen²

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Integrate Avionics System Design Department, Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: Airborne phased array radar is greatly affected by ground clutter when it is working downwards. Although the space-time adaptive processing (STAP) technology has good performance of suppressing clutter, its performance depends on a large number of training samples and high computational complexity, it is difficult to apply in practice. In order to make up for the shortcomings of the STAP algorithm, an optimization algorithm for local joint processing (JDL) is proposed. When constructing the dimensionality reduction matrix, the method adjusts the selection strategy of the local processing region, four independent auxiliary channels are selected at the clutter ridge corresponding to the main channel to improve the directivity of the beam and cancel the clutter in the main beam. The results show that the optimized method has better clutter suppression performance than the traditional JDL method, further reduces the amount of system calculation, and maintains better stability in the case of amplitude-phase error.

Keywords: airborne phased array radar; STAP; JDL algorithm; dimensionality reduction matrix; clutter suppression

0 引 言

相控阵雷达的波束控制能力较强,能够在复杂环境中提高动目标的检测性能^[1-2]。但机载相控阵雷达在下视工作时,接收到的回波数据中含有大量功率较强的地杂波^[3-4],会对目标信号的探测产生干扰,而且由于机载雷达并不像地基雷达那样静止不动,雷达杂波数据具有空时耦合性^[5-6]。为此,Brennan 等^[7]提出了空时自适应处理技术(space-time adaptive processing, STAP)。STAP 利用空域和时域上的信息对杂波进行抑制和信号积累^[8-13],能够在强杂波环境中检测缓慢移动目标,因而受到了广泛的关注。

为了使 STAP 达到良好的杂波抑制和动目标检测效果,需要准确地估计杂波协方差矩阵,这依赖于大量独立且分布均匀(independent and identically distributed, IID)的训练样本,但在实际环境中很难得到^[14-15]。此外,即使有足够的 IID 样本可用,理想最优的 STAP 也需要高维的矩阵求逆,其运算量是十分庞大的,这使得 STAP 技术很难应用于实际系统中。为了能够解决上述问题,人们开始转向对数据降维处理^[16]的研究。降维 STAP 方法通过构建降维矩阵对回波数据做线性变换来降低系统的维数,以减少系统所需 IID 训练样本数量和系统计算量,使得 STAP 技术能够应用于现实工程之中。经典的降维算法有因子法(FA)^[17]、扩展因子法(EFA)^[17-18]、辅助通道算法(ACR)^[19]

收稿日期:2020-11-24

• 142 •

和联合局域自适应算法(JDL)^[20]等。其中,JDL 方法被认为是最有效的降维 STAP 算法之一^[12],该算法属于固定降维结构,利用二维离散傅里叶变换(DFT),可以将雷达回波数据由空时域转换到波束-多普勒域,然后选择感兴趣的局域处理单元(LPR)进行自适应处理^[21]。虽然 JDL 算法在理想情况下具有较好的杂波抑制效果,但受幅相误差的影响较大^[22]。文献[21]结合了广义相邻多波束算法和 JDL 算法,对原有 JDL 算法进行了优化,该方法先将雷达回波数据由空时域转换到波束-多普勒域,然后以 $1/M$, $1/N$ 为间隔在空时域上选择相邻的多普勒单元和角度单元形成处理域,最后融合两种算法的局域处理单元进行自适应滤波,虽然该优化算法增强了在杂波抑制性能,但在幅相误差下,旁瓣处的性能改善有限。文献[23]提出了融合 JDL 和组合空时主通道的降维改进方法,该方法先选取空时主通道,然后以空域主波束为中心,将波束-多普勒域分成均匀的若干组以形成局部处理域,然后进行对杂波的自适应滤波,虽然该方法有效降低了幅相误差的影响,但系统的复杂度较高。

针对传统 JDL 算法的系统处理性能受幅相误差影响较大的问题,本文提出了一种改进的 JDL 方法,该方法调整了 LPR 的选取策略,并在时域主通道对应的杂波脊附近选取了 4 个独立的辅助通道,以提高波束的指向性、抵消主波束中的杂波,进一步提升了系统的杂波抑制性能。实验结果表明该优化算法在保持较低运算量的同时,达到了性能次最优的效果,并且当系统存在幅相误差时,仍然能够保持较好的稳定性。

1 理论分析

1.1 信号模型及空时自适应处理基础

为了方便分析,设定雷达天线为正侧阵,且按俯仰方向对平面天线合成子阵,则其等效成一个均匀的 N 元线阵,在一个相干处理间隔内发送 K 个脉冲,距离门数量为 L 。根据 J.Ward 的雷达回波数据模型,将第 l 个距离门第 n 个阵元的第 k 个脉冲数据表示成 $x_l(n, k)$, $l = 1, 2, \dots, L$; $n = 1, 2, \dots, N$; $k = 1, 2, \dots, K$ 。

在距离维上,将雷达空时二维回波数据进行展开,其中第 l 个距离单元的接收数据用 $\mathbf{X}_l$ 表示。

$$\mathbf{X}_l = \begin{cases} x_l(1,1)x_l(2,1)\cdots x_l(n,1)\cdots x_l(N,1) \\ x_l(1,2)x_l(2,2)\cdots x_l(n,2)\cdots x_l(N,2) \\ \vdots \\ x_l(1,k)x_l(2,k)\cdots x_l(n,k)\cdots x_l(N,k) \\ \vdots \\ x_l(1,K)x_l(2,K)\cdots x_l(n,K)\cdots x_l(N,K) \end{cases} \quad (1)$$

不失一般性, $\mathbf{X}_l$ 的第 k 个脉冲接收数据定义成 $\mathbf{x}_l(k)$:

$$\mathbf{x}_l(k) = [x_l(1,k)\cdots x_l(n,k)\cdots x_l(N,k)]^T \quad (2)$$

为了方便数据的处理和储存,可以利用式(2)中的 $\mathbf{x}_l(k)$ 将 $\mathbf{X}_l$ 排列成 $NK \times 1$ 维列矢量:

$$\mathbf{X}_l = [\mathbf{x}_l^T(1) \mathbf{x}_l^T(2) \cdots \mathbf{x}_l^T(k) \cdots \mathbf{x}_l^T(K)]^T \quad (3)$$

在 H_0 (目标不存在) 和 H_1 (目标存在) 二元假设情形下, $\mathbf{X}_l$ 可表示为:

$$\mathbf{X} = \begin{cases} \mathbf{C} + \mathbf{N}, & H_0 \\ b\mathbf{S} + \mathbf{C} + \mathbf{N}, & H_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: b 为目标信号回波复幅度; $\mathbf{C}, \mathbf{N}$ 分别代表杂波矢量和噪声矢量; $\mathbf{S}$ 表示信号空时导向矢量; 即:

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_s(\psi_s) \otimes \mathbf{S}_t(f_d) \quad (5)$$

其中,

$$\mathbf{S}_s(\psi_s) = [1, e^{j\frac{2\pi d \sin \psi_s}{\lambda}}, \dots, e^{j(N-1)\frac{2\pi d \sin \psi_s}{\lambda}}]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{S}_t(f_d) = [1, e^{j2\pi f_d}, \dots, e^{j(K-1)2\pi f_d}]^T \quad (7)$$

式中: $\mathbf{S}_s(\psi_s)$ 和 $\mathbf{S}_t(f_d)$ 分别为空域、时域导向矢量; ψ_s 为空域锥角; f_d 为归一化多普勒频率; λ 为雷达波长; d 为阵元间距。

根据 LCMV 准则, 可将 STAP 权矢量的求解转化为如下的数学优化问题^[24]。

$$\begin{cases} \min \mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W} \\ s.t. \mathbf{W}^H \mathbf{S} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{R} = E[\mathbf{X}\mathbf{X}^H]$ 为接收数据形成的 $NK \times NK$ 维协方差矩阵, 求解式(8)得到 STAP 最优权矢量 $\mathbf{W}_{opt}$ 为:

$$\mathbf{W}_{opt} = \mu \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S} \quad (9)$$

式中: $\mu = \frac{1}{\mathbf{S}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}}$ 为归一化系数。通常, 接收数据的协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 往往不能准确获得, 可以由最大似然估计所得:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{X}_l \mathbf{X}_l^H \quad (10)$$

其中, L 代表 IID 样本数, 为使得性能损失在 3 dB 以内, L 要大于系统自由度的 2 倍^[25], 即 $L \geq 2M - 3$, $M = N \times K$ 。用 $\hat{\mathbf{R}}$ 重新表示 $\mathbf{W}_{opt}$ 为:

$$\mathbf{W}_{opt} = \frac{\hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{S}}{\mathbf{S}^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{S}} \quad (11)$$

为了评估 STAP 对杂波抑制的性能, 通常用改善因子 IF 来表示:

$$IF = \frac{|\mathbf{W}_{opt}^H \mathbf{S}| (CNR_i + 1) \sigma_n^2}{\mathbf{W}_{opt}^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{W}_{opt}} \quad (12)$$

式中: σ_n^2 是噪声的输入功率; CNR_i 是输入杂噪比。

1.2 改进的 JDL-STAP 算法分析

在上文提到, 为了使 STAP 达到最佳的处理效果, 需要大量的 IID 样本, 且计算量较大。为了方便应用, 需要对数据做降维转换。

JDL 利用二维离散傅里叶变换, 将雷达回波数据由空时域转换到波束-多普勒域, 然后以主波束为中心, 选取相邻的角度单元和多普勒单元作为辅助通道来构成局域处理单元, 降维后的系统处理域包括 η_s 个角度单元和 η_t 个多普

勒单元,选择降维区域的大小和全维 STAP 的系统自由度没有关联,所以回波数据经过了降维矩阵 $\mathbf{T}$ 处理后,自适应处理前后的杂波自由度相互独立,因而可以根据实际需求来选择 LPR 的范围。

在将回波数据由空时域转换到波束-多普勒域时,为了使其满足离散傅里叶变换,在选取 LPR 时,在空、时域分别以 $1/N$ 和 $1/K$ 为间隔进行选取。LPR 的选取原则为:将空域主波束方位 ψ_0 固定,以 $1/N$ 为间隔来选择相邻的角度单元,表示为: $(\psi_0 - \frac{\eta_s - 1}{2N}, \dots, \psi_0 - \frac{1}{N}, \psi_0, \psi_0 + \frac{1}{N}, \dots, \psi_0 + \frac{\eta_s - 1}{2N})$; 以多普勒频率 f_q 为中心,以 $1/K$ 为间隔来选择相邻的多普勒单元,表示为: $(f_q - \frac{\eta_t - 1}{2K}, \dots, f_q - \frac{1}{K}, f_q, f_q + \frac{1}{K}, \dots, f_q + \frac{\eta_t - 1}{2K})$, 其中 $f_q \in [-1, 1], q = 1, 2, \dots, K$ 。然后把该局域处理单元在整个角度多普勒域进行扫描,从而实现自适应滤波处理。这里以 $\eta_s = 5, \eta_t = 5$ 为例来选取 LPR,如图 1 所示。

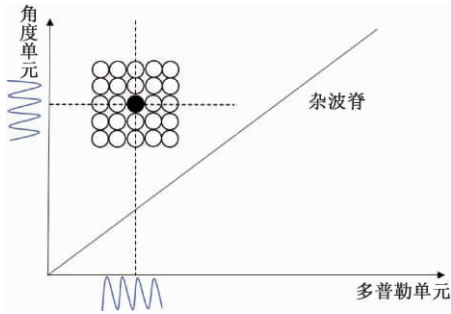


图 1 LPR 选取

在图 1 中,黑色单元为目标所在主通道,白色单元为 LPR 内选取的辅助通道,中间的斜线表示杂波脊。

为了进一步提升 JDL 算法的杂波抑制能力,降低系统误差的影响,本文借鉴 ACR 算法在杂波脊处选取辅助通道的思路,设计了一种优化的 JDL 算法,该算法不仅降低了系统自由度和计算量,而且进一步提升了杂波抑制性能和稳定性。该方法在选取局域处理单元时,减少了最外围的辅助通道数量,并在时域主通道两侧保留了两个独立的辅助通道,同时在时域主通道对应的杂波脊处选取四个独立的辅助通道。其中,沿杂波脊处的两个独立的辅助通道利用广义旁瓣相消原理来抵消主波束中的杂波^[26-27];与主通道多普勒频率相对应的两个辅助波束用以降低波束副瓣,提高空域波束的指向性。改进后的 JDL 算法局域处理单元的选取如图 2 所示。

对比图 1 和 2 不难发现,改进后算法的辅助通道数量比之前少了 4 个,其计算量更低。下面用数学方式来描述改进后 JDL 算法所构造的降维矩阵 $\mathbf{T}$:

$$\mathbf{T} = [\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \mathbf{T}_3, \mathbf{T}_4, \mathbf{T}_5] \quad (13)$$

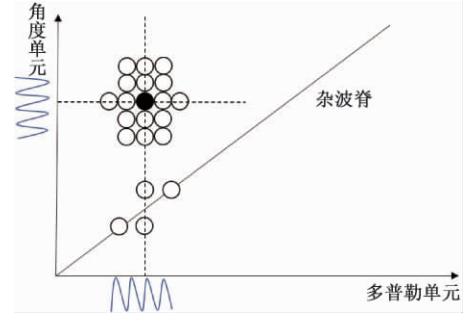


图 2 改进后 JDL 算法的 LPR 选取

其中, $\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \mathbf{T}_3, \mathbf{T}_4, \mathbf{T}_5$ 分别表示为:

$$\mathbf{T}_1 = \left[S_t \left(f_q - \frac{1}{K} \right), S_t(f_q), S_t \left(f_q + \frac{1}{K} \right) \right] \otimes \left[S_s \left(\psi_0 - \frac{2}{N} \right), S_s \left(\psi_0 - \frac{1}{N} \right), S_s(\psi_0), S_s \left(\psi_0 + \frac{1}{N} \right), S_s \left(\psi_0 + \frac{2}{N} \right) \right] \quad (14)$$

$$\mathbf{T}_2 = \left[S_t \left(f_q - \frac{2}{K} \right), S_t \left(f_q + \frac{2}{K} \right) \right] \otimes S_s(\psi_0) \quad (15)$$

$$\mathbf{T}_3 = [S_t(f_{d0})] \otimes [S_s(\omega_{s0} - \Delta\psi), S_s(\omega_{s0} + \Delta\psi)] \quad (16)$$

$$\mathbf{T}_4 = [S_t(f_{d0} - \Delta f)] \otimes [S_s(\omega_{s0} - \Delta\omega)] \quad (17)$$

$$\mathbf{T}_5 = [S_t(f_{d0} + \Delta f)] \otimes [S_s(\omega_{s0} + \Delta\omega)] \quad (18)$$

其中, f_{d0} 和 ω_{s0} 分别为杂波主通道多普勒频率和空域频率,杂波脊处辅助通道选取的间隔 Δf 和 $\Delta\omega$ 分别可由下式计算得出:

$$\Delta\omega = \frac{\omega_s^{\max} - \omega_s^{\min}}{N + K - 1} \quad (19)$$

$$\Delta f = \frac{f_d^{\max} - f_d^{\min}}{N + K - 1} \quad (20)$$

其中, $\omega_s^{\max}$ 和 $\omega_s^{\min}$ 为空域频率的取值范围; $f_d^{\max}$ 和 $f_d^{\min}$ 为多普勒频率的取值范围。

降维矩阵 $\mathbf{T}$ 的维度为 $NK \times 21$,经过降维矩阵 $\mathbf{T}$ 变换后的接收数据和空时二维导向矢量为:

$$\mathbf{X}'_l = \mathbf{T}^H \mathbf{X}_l \quad (21)$$

$$\mathbf{S}' = \mathbf{T}^H \mathbf{S} \quad (22)$$

由上式分析知,接收数据 $\mathbf{X}_l$ 经 $\mathbf{T}$ 变换后的维度由 $NK \times 1$ 降低到 21×1 ,极大降低了系统的自由度和运算量,降维后的协方差矩阵为:

$$\hat{\mathbf{R}}' = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{X}'_l (\mathbf{X}'_l)^H = \mathbf{T}^H \hat{\mathbf{R}} \mathbf{T} \quad (23)$$

将 $\hat{\mathbf{R}}'$ 和 $\mathbf{S}'$ 代入式(11),则经降维后的最优权矢量 $\mathbf{W}'_{\text{opt}}$ 为:

$$\mathbf{W}'_{\text{opt}} = \frac{(\hat{\mathbf{R}}')^{-1} \mathbf{S}'}{(\mathbf{S}')^H (\hat{\mathbf{R}}')^{-1} \mathbf{S}'} \quad (24)$$

降维后 STAP 处理器的改善因子可进一步表示为:

$$IF' = \frac{|(W'_{opt})^H S'| (CNR_i + 1) \sigma_n^2}{(W'_{opt})^H \hat{R} W'_{opt}} \quad (25)$$

2 仿真实验与分析

本文对最优 STAP、JDL 以及改进 JDL-STAP 算法进行了仿真实验,实验所用系统参数如表 1 所示,仿真环境分别为理想条件和误差条件。其中 JDL 选取如图 1 所示 5×5 的局域处理单元,改进的 JDL 算法局域处理单元选取结构如图 2 所示。

表 1 系统仿真实验参数

参数类型	参数值
高度/m	8 000
速度/(m·s ⁻¹)	100
阵元数量	16
脉冲数量	16
波长/m	0.2
主瓣方向/(°)	(90,0)
脉冲重复频率/Hz	2 000
偏航角/(°)	0

通过对比,图 3 所示为各算法的系统改善因子不难发现,在理想条件下,最优 STAP 算法的处理效果最好,JDL 和本文提出的改进算法的处理性能稍有不足,这是因为最优 STAP 算法没有经过数据降维处理,系统的自由度最高,杂波抑制性能也就最好,但在实际工程应用之中,庞大的计算量显然不能满足实时性要求。从实验结果来看,JDL 和改进后算法的性能虽然有一定的降低,但这种损耗是在可接受范围内的,系统经降维后,计算量大幅度减少,易于工程实现。而且由于改进后的 JDL 算法在主波束对应的杂波脊处选取了辅助通道,其形成的波束可以有效对消主波束杂波,所以改进后算法的系统性能更加接近于最优自适应处理,杂波抑制能力进一步提升,尤其是在主瓣处的处理效果比原有 JDL 算法更好,如图 4 所示,改进后算法的系统改善因子的凹口更窄,减小了信号的能量损失,较窄的凹口有利于慢速运动目标的检测,并能防止靠近主杂波处的目标信号被抑制。

如图 5 所示,在加入阵元误差后,两种降维算法的性能都受到了较大的影响,尽管在旁瓣处两者的杂波抑制性能存在较大的波动,但改进后的 JDL 算法仍比传统算法拥有较好处理效果。在图 6 所示 5% 的时域误差下,改进前后的 JDL 算法都保持了较好的杂波抑制性能,传统 JDL 算法对于旁瓣的处理效果更好,而改进后算法有着更好的主瓣杂波抑制能力,其凹口较窄。当系统存在通道幅相误差时,由图 7 所示的仿真结果不难看出,原有 JDL 算法的系统性能受到了较大的影响,对于旁瓣的杂波抑制能力大幅度降低,而且波动较大,系统整体性能损失较为严重。而改进后

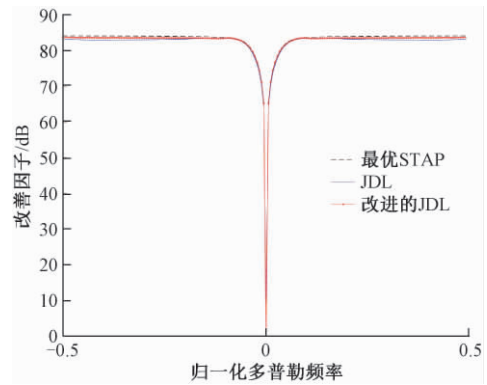


图 3 理想条件下各算法改善因子

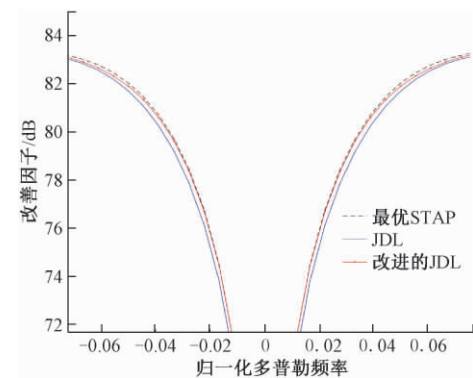


图 4 理想条件下改善因子放大图

算法依然能够保持较好的杂波抑制能力,虽然旁瓣处也出现了抖动情况,但相比于原有 JDL 算法,系统性能的浮动较小,这是因为改进后的 JDL 算法由于优化了辅助通道结构,波束指向性较好,在系统幅相误差情况下能够保持较好的稳定性。

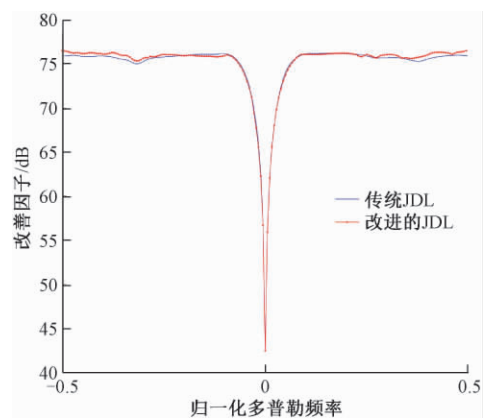


图 5 5%阵元误差下各算法改善因子

下面就 3 种算法的运算量、所需样本数和辅助通道数量进行分析,相关实验数据如表 2 所示。不难发现,虽然全维 STAP 的杂波抑制能力最强,但需要庞大的样本数量和

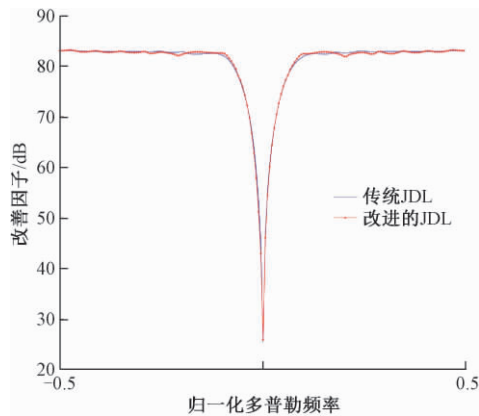


图 6 6%时域误差下各算法改善因子

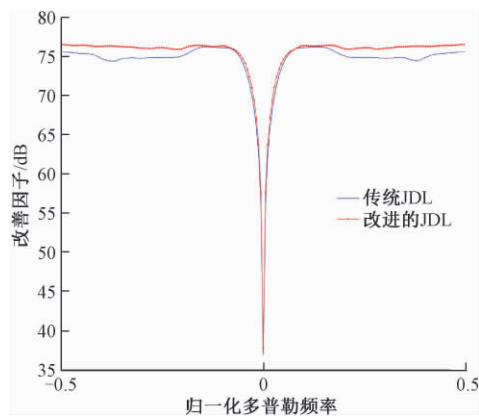


图 7 5%幅相误差下各算法改善因子

运算量,对于需要实时处理的机载雷达来说,这是难以接受的。而两种降维算法的运算量和所需样本数量经过降维处理后,都有了大幅度的减少,尤其是改进后的 JDL 算法需要的运算量和训练样本数量更少,也拥有更好的杂波抑制性能。

表 2 3 种算法的运算量、所需样本数和辅助通道数量

算法类型	运算量	样本数	辅助通道数
最优 STAP	$O[(256)^3]$	512	—
JDL	$O[(25)^3]$	50	25
改进 JDL	$O[(21)^3]$	42	21

综上所述,相比于原有 JDL 算法,本文提出的改进算法进一步降低了系统复杂度,而且在理想情况下拥有更好的杂波抑制性能,即使系统存在通道幅相误差,改进后的 JDL 算法仍然能够保持较好的稳定性。

3 结 论

本文提出了一种改进的 JDL-STAP 降维处理算法,该方法在选取局域处理单元时,除了调整局域处理单元外,还

在时域主通道对应的杂波脊处选取 4 个独立的辅助通道,用以抵消主波束杂波并增强空域波束的指向性。分别在理想和误差环境下进行了实验仿真,实验结果表明,本文提出的改进 JDL 算法的系统自由度和计算量更低,系统的杂波抑制能力更好,并能够在幅相误差情况下保持较好的系统稳定性。

参考文献

- [1] 曾文浩,朱晓华,李洪涛,等.基于矩阵填充的子阵重构二维波达方向估计算法[J].南京理工大学学报,2017,41(3):337-343.
- [2] 廖俊,于雷,周中良,等.机载相控阵雷达探测参数优化[J].仪器仪表学报,2012,33(11):2487-2494.
- [3] 谢文冲,段克清,王永良.机载雷达空时自适应处理技术研究综述[J].雷达学报,2017,6(6):575-586.
- [4] 刘文涛,刘豫,张焘.非均匀杂波环境下相控阵机载雷达 STAP 技术研究[J].信息通信,2015(7):7-8.
- [5] 李晓明,冯大政,罗钉,等.相控阵机载雷达杂波抑制的空时可分离自适应滤波[J].数据采集与处理,2009,24(5):549-555.
- [6] 董鑫,杨国鹏,张良,等.利用发射自由度提高机载相控阵雷达检测性能的方法[J].现代雷达,2020,42(2):58-62.
- [7] BRENNAN L, PIWINSKI D, STAUDAHER F. Comparison of space-time adaptive processing approaches using experimental airborne radar data[C]. The Record of the 1993 IEEE National Radar Conference, 1993: 176-181.
- [8] 龚文飞,孙昕.基于多级嵌套维纳滤波自适应对角加载 STAP 算法[J].电子测量与仪器学报,2010,24(10):899-904.
- [9] 季文韬.基于块稀疏恢复的空时自适应信号处理研究[D].南京:南京理工大学,2017.
- [10] LI Z, ZHANG Y, GE Q, et al. Off-grid STAP algorithm based on reduced-dimension local search orthogonal matching pursuit [C]. 2019 IEEE 4th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), 2019: 187-191.
- [11] 李昕哲,谢文冲,王永良.空时误差情况下的 STAP 方法性能分析[J].信号处理,2020,36(3):439-448.
- [12] 侯静,胡孟凯,王子微.一种改进的知识辅助 MIMO 雷达空时自适应处理方法[J].电子与信息学报,2019,41(4):795-800.
- [13] 张琪,沈明威,李建峰.基于稀疏重构的 KA-STAP 杂波协方差矩阵高精度估计算法[J].国外电子测量技术,2019,38(3):14-18.
- [14] 李志江,张永顺,高乾,等.基于局部搜索 OMP 的网格失配 STAP 算法[J].系统工程与电子技术,2018,40(6):1221-1226.

- [15] 张虞健,周良将.基于改进 SAMP 的 MIMO 雷达 STAP 稀疏恢复算法[J].电子测量技术,2020,43(14):154-159.
- [16] WANG Y, PENG Y, BAO Z. Space-time adaptive processing for airborne radar with various array orientations [J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 1997, 144(6): 330-340.
- [17] DIPPETRO R. Extended factored space-time processing for airborne radar system [C]. Conference Record of the Twenty-Sixth Asilomar Conference on Signals, 1992: 425-430.
- [18] BAO Z, WU S, LIAO G, et al. Review of reduced rank space-time adaptive processing for airborne radar [C]. Proceedings of International Radar Conference, 1996: 766-769.
- [19] KLEMM R. Space-time adaptive processing: Principles and applications [J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 1999, 11(4): 172-172.
- [20] WANG H, CAI L. On adaptive spatial-temporal processing for airborne surveillance radar systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(3): 660-669.
- [21] 张贝贝,严家明.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.
- [22] 王永良,李天泉.机载雷达空时自适应信号处理技术回顾与展望[J].中国电子科学研究院学报,2008,3(3): 271-276.
- [23] 李海,宋迪,呼延泽,等.LFMCW 体制下基于 TDPC-JDL 的低空风切变风速估计方法[J].系统工程与电子技术,2020,42(7):1504-1509.
- [24] 李清.基于 FPGA 的 STAP 实现技术研究[D].成都:电子科技大学,2015.
- [25] 廖桂生,许京伟,李婕,等.弹载相控阵雷达系统设计与信号处理问题[J].航空兵器,2017(1):3-9.
- [26] 巩继玲,廖桂生,许京伟,等.一种参数估计的自适应辅助通道方法[J].西安电子科技大学学报,2014,41(3): 8-13.
- [27] 王万林,廖桂生,张光斌.在非均匀环境下辅助通道法 STAP 处理的性能改善[J].西安电子科技大学学报,2004(5):761-764.

作者简介

陈怀庆, 硕士研究生, 主要研究方向为导航制导与控制。

E-mail: chq_shu@shu.edu.cn

张小贝, 博士, 教授, 主要研究方向为特种光纤器件、光学谐振腔和光纤传感。

E-mail: xbzhang@shu.edu.cn

方习高, 硕士研究生, 研究员, 主要研究方向为民机航电系统综合设计。

E-mail: fangxigao@comac.intra

吴琛, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为民机综合监视系统。

E-mail: wuchen@comac.intra