

机载 MIMO 雷达修正 GMB 降维方法

冯为可, 张永顺, 赵杰

(空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051)

摘要 针对 MIMO 雷达空时自适应处理运算量和杂波抑制性能难以兼顾的问题, 建立了 MIMO 雷达杂波数学模型, 提出了机载 MIMO 雷达的修正广义相邻多波束降维方法。该方法基于局域化处理的思想, 通过选取特定的发射波束、接收波束和多普勒通道, 利用空域二维波束形成和时域多普勒滤波方法进行空时自适应处理。对该方法在不同误差条件下杂波抑制性能进行了仿真实验, 结果表明: 提出的修正广义相邻多波束方法能够大幅降低运算量和样本需求数, 有效抑制杂波, 提高慢速目标的检测能力。

关键词 机载 MIMO 雷达; 空时自适应处理; 局域化; 修正 GMB 降维方法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.01.007

中图分类号 V243.2; TN959.73 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)01-0028-04

A Modified Generalized Adjacent Multiple-beam Approach of STAP for Airborne MIMO Radar

FENG Wei-ke, ZHANG Yong-shun, ZHAO Jie

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

Abstract: In this paper, a clutter model for airborne MIMO radar is established, and a computationally reduced-dimension space-time adaptive processing method-Modified GMB method is presented. The method is used to perform space-time adaptively processing by choosing special transmitting beams, receiving beams and Doppler filters and by utilizing the two-dimensional spatial beam forming and temporal Doppler filtering. At last, the clutter suppression performance is emulated and compared under the conditions of different errors. The simulation results show that the use of this method can significantly reduce the computational load and training cells, and the suppression performance of the method is effective.

Key words: airborne MIMO radar; STAP; domain Localized; modified GMB reduced-dimension method

多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)雷达是雷达领域的一种新体制, 通过发射接收多个正交波形或非相干信号, 利用较小的天线规模即可获得很大的虚拟阵列孔径及系统自由

度^[1], 能显著提升雷达的角度分辨率、参数估计精度和杂波抑制性能^[2-3]。空时自适应处理(Space Time Adaptive Processing, STAP)是机载雷达动目标探测的关键技术, 目前的研究已经基本趋于成熟。为

收稿日期: 2014-04-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61372033)

作者简介: 冯为可(1992-), 男, 河南平顶山人, 硕士生, 主要从事机载雷达空时自适应处理. E-mail: fwk5482994@163.com

引用格式: 冯为可, 张永顺, 赵杰. 机载 MIMO 雷达修正 GMB 降维方法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2015, 16(1): 28-31. FENG Weike, ZHANG Yongshun, ZHAO Jie. A Modified Generalized Adjacent Multiple-beam Approach of STAP for Airborne MIMO Radar[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(1): 28-31.

了提高机载 MIMO 雷达的杂波抑制能力,STAP 技术被推广至 MIMO 雷达系统中,形成了 MIMO-STAP^[3] 技术,得到了很好的发展。

由于 MIMO-STAP 技术需要对高维协方差矩阵进行估计和求逆,且发射波形分集使得空时维数相对相控阵雷达大幅提高,因此,MIMO-STAP 降维方法成为该领域的研究热点。传统相控阵降维 STAP 方法,如局域联合处理法(Joint Domain Localized, JDL)^[4] 和广义相邻多波束(Generalized Adjacent Multiple-Beam, GMB)^[5] 等可以应用于 MIMO-STAP 处理中,但会导致杂波抑制性能下降或者运算量增大,不利于慢速目标检测。

本文针对上述问题,提出了一种 MIMO 雷达基于局域化处理思想^[6] 的修正广义相邻多波束(Modified Generalized Adjacent Multiple-Beam, MGMB)降维方法。

1 机载 MIMO 雷达杂波模型

假设载机以平行于 x 轴的正向匀速飞行,飞行速度为 V ,载机高度为 H 。雷达天线由正侧面均匀线阵组成,天线发射阵列和接收阵列均为等距线阵,发射阵元数为 M ,接收阵元数为 N ,发射阵间距为 d_t ,接收阵间距为 d_r 。一个相干处理间隔内的脉冲数为 K ,发射脉冲为正交相位编码,载机移动距离远小于雷达与杂波间的斜距,即雷达与杂波源的相对几何关系近似不变。杂波散射单元方位角为 θ ,俯仰角为 φ ,锥角为 ψ 。

使用矢量形式建立 MIMO 雷达杂波回波模型,发射阵元的发射导向矢量和接收阵元的接收导向矢量分别为:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{St}(\omega_s) = [1, 2, \dots, e^{j(M-1)\omega_s(\theta, \varphi)\alpha}]^T \in C^{M \times 1} \\ \mathbf{S}_{Sr}(\omega_s) = [1, 2, \dots, e^{j(N-1)\omega_s(\theta, \varphi)}]^T \in C^{N \times 1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\alpha = d_t/d_r$ 为发收间距比; $\omega_s(\theta, \varphi)$ 、 $\omega_t(\theta, \varphi)$ 分别为空域角频率和时域角频率:

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

式中: f_{prf} 和 λ 分别为雷达脉冲重复频率和波长。

在接收阵元处,利用 M 个发射信号对 K 个杂波回波脉冲进行匹配滤波,一个杂波点源回波数据可表示为:

$$c(\theta) = \rho(\theta) \mathbf{S}_T(\omega_t) \otimes \mathbf{S}_{St}(\omega_s) \otimes \mathbf{S}_{Sr}(\omega_s) = \rho(\theta) \mathbf{S}(\omega_s, \omega_t) \in C^{MNK \times 1} \quad (3)$$

式中: $\rho(\theta)$ 为服从均值为 0 的高斯杂波散射系数; \otimes 为 Kronecker 积; $\mathbf{S}_T(\omega_t)$ 和 $\mathbf{S}(\omega_s, \omega_t)$ 分别为杂

波多普勒导向矢量和空时二维导向矢量:

$$\mathbf{S}_T(\omega_t) = [1, e^{j\omega_t(\theta_t, \varphi)}, \dots, e^{j\omega_t(\theta_t, \varphi)(K-1)}]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{S}(\omega_s, \omega_t) = \mathbf{S}_T(\omega_t) \otimes \mathbf{S}_{St}(\omega_s) \otimes \mathbf{S}_{Sr}(\omega_s) \quad (5)$$

对一个距离环上的所有杂波点源回波数据进行积分,得该距离环上的总杂波为:

$$x = \int_0^{2\pi} \rho(\theta) \mathbf{S}(\omega_s, \omega_t) d\theta \in C^{MNK \times 1} \quad (6)$$

进一步可得杂波的协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_c = \int_0^{2\pi} [\rho^2(\theta) \mathbf{R}_{ST}] d\theta \in C^{MNK \times MNK} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{R}_{ST} = \mathbf{S}(\omega_s, \omega_t) \mathbf{S}(\omega_s, \omega_t)^H$ 。

2 机载 MIMO 雷达 MGMB 降维方法

相控阵雷达的局域化降维方法的主要思想为:首先将空时二维数据经离散傅里叶变换,转换到波束-多普勒域,然后基于对目标的估计,选取相应的局域,形成降维矩阵,进行自适应处理。其中,JDL 方法性能较好,但自由度较高,而且当存在较大误差时,稳定性较差;GMB 方法性能低于 JDL 方法,但自由度低,稳定性好^[7]。

局域化降维处理辅助通道的选择存在多样性,可以将 JDL 方法和 GMB 方法的加以融合,在保证杂波抑制性能的前提下,降低自由度并保持稳定性。文献^[6]基于上述思想,对相控阵雷达 GMB 降维方法进行了改进。其原理为:时域上,在保留主通道之外,还保留了与主通道相邻的数个辅助通道;空域上,在主通道的基础上增加辅助通道,用来增加空域自由度。

由式(6)和式(7)可以看出,机载 MIMO 雷达所接收的回波数据具有发射波束、接收波束和时域脉冲三维结构,可以进行局域化处理^[3]。基于局域化处理思想,本文提出了机载 MIMO 雷达的 MGMB 降维方法,其实现结构和原理示意图见图 1~2。

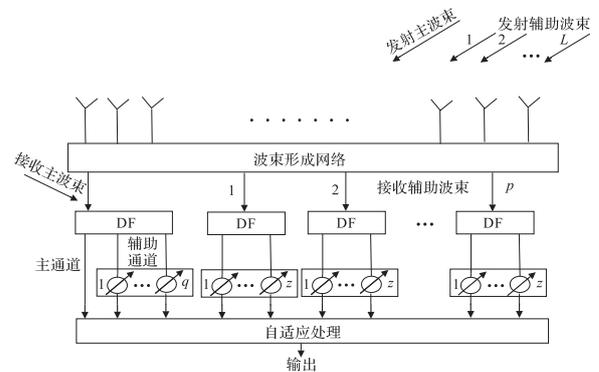


图 1 MGMB 降维方法结构示意图

Fig.1 Structure of modified GMB-STAP method

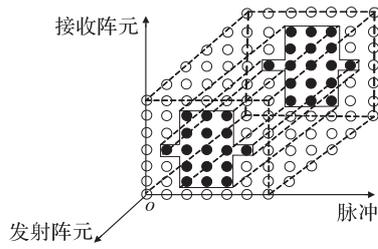


图2 MGMB降维方法原理示意图

Fig.2 Principle of modified GMB-STAP method

其原理可以概述为:首先使用 Butler 波束形成器,同时生成多个发射和接收波束;其次,基于对目标的估计,选取一定数量的发射波束(发射主波束和辅助波束)作为空时自适应处理的基础;再次,在选取的接收主波束和相邻的辅助接收波束之后级联多普勒滤波器组(Doppler Filter, DF);然后,在时域上,对接收波束增加多普勒辅助通道;最后,根据线性约束最小输出功率准则,对接收主波束输出的多个相邻多普勒通道和多个辅助接收波束进行自适应处理。上述过程可以等效为利用降维矩阵 \mathbf{T} 对回波信号进行变换, \mathbf{T} 可以表示为:

$$\mathbf{T} = [\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_{1+z}, \dots, \mathbf{T}_{1+z}, \mathbf{T}_2] \in C^{MNK \times l(z \times p + q)} \quad (8)$$

式中:

$$\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} [\mathbf{S}_t(\omega_{t_i}) \otimes \mathbf{S}_{st}(\omega_{s_1}) \otimes \mathbf{S}_{sr}(\omega_{s_1})]^T \\ \vdots \\ [\mathbf{S}_t(\omega_{t_i}) \otimes \mathbf{S}_{st}(\omega_{s_1}) \otimes \mathbf{S}_{sr}(\omega_{s_p})]^T \\ \vdots \\ [\mathbf{S}_t(\omega_{t_i}) \otimes \mathbf{S}_{st}(\omega_{s_l}) \otimes \mathbf{S}_{sr}(\omega_{s_p})]^T \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{T}_{1+z} = \begin{bmatrix} [\mathbf{S}_t(\omega_{t_{i+z}}) \otimes \mathbf{S}_{st}(\omega_{s_1}) \otimes \mathbf{S}_{sr}(\omega_{s_1})]^T \\ \vdots \\ [\mathbf{S}_t(\omega_{t_{i+z}}) \otimes \mathbf{S}_{st}(\omega_{s_1}) \otimes \mathbf{S}_{sr}(\omega_{s_p})]^T \\ \vdots \\ [\mathbf{S}_t(\omega_{t_{i+z}}) \otimes \mathbf{S}_{st}(\omega_{s_l}) \otimes \mathbf{S}_{sr}(\omega_{s_p})]^T \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} [\mathbf{S}_t(\omega_{t_1}) \otimes \mathbf{S}_{st}(\omega_{s_1}) \otimes \mathbf{S}_{sr}(\omega_{s_j})]^T \\ \vdots \\ [\mathbf{S}_t(\omega_{t_q}) \otimes \mathbf{S}_{st}(\omega_{s_1}) \otimes \mathbf{S}_{sr}(\omega_{s_j})]^T \\ \vdots \\ [\mathbf{S}_t(\omega_{t_q}) \otimes \mathbf{S}_{st}(\omega_{s_l}) \otimes \mathbf{S}_{sr}(\omega_{s_j})]^T \end{bmatrix}^T$$

式中: ω_{sh} ($h=1,2,\dots,l$)、 ω_{si} ($i=1,2,\dots,p$)、 ω_{sj} ($j=1,2,\dots,q$) 分别为第 h 个发射波束、第 i 个接收波束和第 j 个时域多普勒的归一化角频率, l 、 p 和 q 分别为选取的发射波束、接收波束和多普勒通道的数目; $\{z \leq 1, 2, \dots, q-1\}$ 为增加的多普勒辅助通道数; $\mathbf{S}_{st}(\omega_{sh})$ 、 $\mathbf{S}_{sr}(\omega_{si})$ 和 $\mathbf{S}_t(\omega_{sj})$ 分别为发射波束空域、接收波束空域和时域的加权导向矢量:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{sr}(\omega_{si}) = [\omega_1, \dots, \omega_N e^{j(N-1)\omega_{si}}]^T \\ \mathbf{S}_{st}(\omega_{sh}) = [a_1, \dots, a_M e^{ja(N-1)\omega_{sh}}]^T \\ \mathbf{S}_t(\omega_{sj}) = [h_1, \dots, h_K e^{j(K-1)\omega_{sj}}]^T \end{cases} \quad (9)$$

式中: ω_n ($n=1,2,\dots,N$)、 a_m ($m=1,2,\dots,M$)、 h_k ($k=1,2,\dots,K$) 分别为接收波束、发射波束和时域的静态加权系数。

对杂波进行 MGMB 处理的过程为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{T}^H \mathbf{x} \in C^{l(z \times p + q) \times 1}$$

$$\tilde{\mathbf{S}}(\omega_s, \omega_t) = \mathbf{T}^H \mathbf{S}(\omega_s, \omega_t) \in C^{l(z \times p + q) \times 1} \quad (10)$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_c = \mathbf{T}^H \mathbf{R}_c \mathbf{T} \in C^{l(z \times p + q) \times l(z \times p + q)}$$

式中: \mathbf{y} 和 $\tilde{\mathbf{S}}(\omega_s, \omega_t)$ 分别为降维杂波回波数据和空时二维导向矢量; $\tilde{\mathbf{R}}_c$ 为降维后的杂波协方差矩阵。

最优自适应权值 \mathbf{W} 和改善因子 IF 分别为:

$$\mathbf{W} = \frac{\tilde{\mathbf{R}}_c^{-1} \tilde{\mathbf{S}}(\omega_{s_0}, \omega_{t_0})}{\tilde{\mathbf{S}}^H(\omega_{s_0}, \omega_{t_0}) \tilde{\mathbf{R}}_c^{-1} \tilde{\mathbf{S}}(\omega_{s_0}, \omega_{t_0})} \quad (11)$$

$$\text{IF} = \frac{|\mathbf{W}^H \tilde{\mathbf{S}}(\omega_{s_0}, \omega_{t_0})| (SCNR_i + 1) \sigma^2}{\mathbf{W}^H \tilde{\mathbf{R}}_c \mathbf{W}} \quad (12)$$

式中: $\tilde{\mathbf{S}}(\omega_{s_0}, \omega_{t_0})$ 为目标降维空时二维导向矢量; σ^2 为输入噪声功率。

经过 MGMB 算法的处理,杂波协方差矩阵的维数由 $MNK \times MNK$ 降到了 $l(z \times p + q) \times l(z \times p + q)$ 维,STAP 中矩阵求逆的运算量和协方差矩阵估计所需参考样本数从 $O((MNK)^3)$ 和 $2MNK$ 减少为 $O((l(z \times p + q))^3)$ 和 $2l(z \times p + q)$ 。

3 仿真分析

对提出的 MGMB 降维方法进行计算机仿真实验,并与最优自适应处理和 JDL 降维方法的杂波抑制性能进行对比。MGMB 和 JDL 降维方法的发射波束、接收波束和多普勒通道的数目选取为 3-7-7; MGMB 算法增加的多普勒辅助通道数为 3。

实验参数为:发射阵元数 8,接收阵元数 8,脉冲数 16,发射阵元间距 0.115 m,接收阵元间距 0.115 m。载机高度 8 km,载机速度 140 m/s,波长 0.23 m,脉冲重复频率 2 434.8 Hz,杂噪比 60 dB。

实验在 5 种条件下进行:①理想情况;②存在阵元误差的情况;③存在通道失配的情况;④存在杂波起伏的情况;⑤多种误差同时存在的情况。实验结果见图 3。

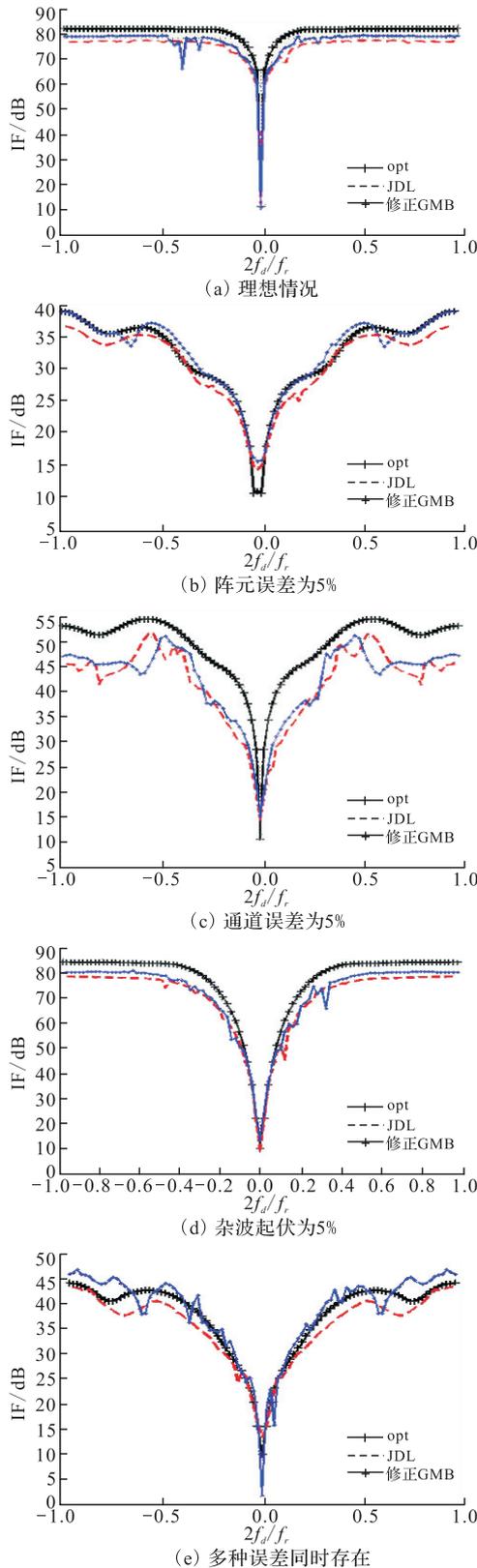


图 3 不同误差条件下的改善因子比较

Fig.3 Compares of the performance of OPT, JDL and MGMB algorithm in different error conditions

由实验结果可以看出, MGMB 方法杂波抑制性能与 JDL 方法相当, 两者都具有较强的主瓣杂波抑制能力。在存在误差的条件下, 相对 JDL 方法, MGMB 方法性能稳定性较好, 对误差不敏感, 这是

因为 MGMB 方法相对 JDL 方法, 波束针对性更强。

JDL 方法所需样本量为 294, 运算量为 $O[(147)^3]$, 本文提出的 MGMB 降维方法所需参考样本数和运算量分别为 168 和 $O[(84)^3]$, 明显大幅减少。

4 结语

本文根据局域化降维方法的思想, 将相控阵降维方法拓展到 MIMO 雷达体制之中, 提出了 MIMO 雷达修正 GDB 降维方法。在不同误差条件下对该方法的杂波抑制性能进行了仿真实验, 实验结果表明修正 GMB 方法具有较强的杂波抑制能力, 运算量小, 特别是在存在误差的情况下, 杂波抑制的优势尤其明显。

参考文献 (References):

[1] 王怀军. MIMO 雷达技术及其应用分析[J]. 雷达科学与技术, 2009, 8(4): 245-249.
WANG Huijun. Technology and Application Analysis of MIMO Radar[J]. Radar Science and Technology, 2009, 8(4): 245-249. (in Chinese)

[2] Bliss D W, Foraythe K W. Multiple-Input Multiple-Output (MIMIO) Radar and Imaging: Degrees of Freedom and Resolution[C]// Proceedings of the 37th IEEE Silomar Conference on Signals Systems Computers. Pacific Grove: IEEE press, 2003: 54-59.

[3] Bekkerman I, Tabrikian J. Target Detection and Localization Using MIMO Radars and Sonars [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2006, 54(10): 3873-3883.

[4] 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.
LÜ Hui, FENG Dazheng, HE Jie, 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)

[5] 和洁. 降维自适应阵列信号处理及其在 MIMO 雷达的应用 [D]. 西安: 电子科技大学, 2011.
HE Jie. Dimension-Reduced Adaptive Array Signal Processing and Its Application to MIMO Radar [D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)

[6] 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 Beibei. An Improved STAP Algorithm Based on Dimension Reduction [J]. Journal of Detection & Control, 2010, 32(6): 37-41. (in Chinese)

[7] 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 Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. (in Chinese)

(编辑: 田新华)