

机载双基地 STAP 的 OP-DW 预处理算法及其性能研究

冯坤菊^{1,2}, 王春阳¹, 段垣丽¹, 张柏华¹, 田 波¹

(1. 空军工程大学导弹学院, 陕西三原 713800; 2. 中国人民解放军 95059 部队, 广东湛江 524329)

摘要: 距离模糊杂波和杂波数据样本距离非均匀对机载双基地雷达杂波 STAP 性能影响严重, 文章提出了一种正交投影-多普勒频移算法以实现模糊杂波抑制和非均匀性补偿. 该算法首先基于待检测距离环杂波空间和时间多普勒频率信息构造空间和时间投影矩阵, 重构杂波数据, 消除模糊杂波, 然后利用多普勒频移对杂波样本间距离非均匀性进行补偿. 仿真表明: 该算法对任意双基地几何场景都有良好适应能力, 可有效提高机载双基地雷达 STAP 性能.

关键词: 机载双基地雷达; 空时自适应处理; 距离模糊; 距离非均匀; 正交投影; 多普勒频移

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 03-0700-05

Research on the OP-DW Algorithm of Bistatic Radar and Its Performance

FENG Kun-ju^{1,2}, WANG Chun-yang¹, DUAN Yuan-li¹, ZHANG Bai-hua¹, TIAN Bo¹

(1. AFEU, Missile Institute, Sanyuan, Shaanxi 713800, China; 2. The 95059 Unit of PLA, Zhanjiang, Guangdong 524329, China)

Abstract: As the performance of STAP of airborne bistatic radar is seriously affected by the range ambiguous clutter and the range nonhomogeneous peculiarity of clutter data samples, an orthogonal projection-Doppler warping method was put forward to cancel the range ambiguous clutter and compensate the nonhomogeneity between clutter data samples. Firstly, this method constructed a space and a time orthogonal projection matrix, which based respectively on the space and the time Doppler frequency of the clutter which returned from the nonambiguous range loop, and used these matrixes to form a new clutter data matrix. Secondly, it gave the new clutter data a Doppler warping to reduce the range nonhomogeneous of samples. The simulation indicates that this method greatly improves the performance of STAP under various bistatic geometries.

Key words: airborne bistatic radar (ABR); space-time adaptive processing (STAP); range ambiguous; range nonhomogeneous; orthogonal projection (OP); Doppler warping (DW)

1 引言

机载双基地雷达 (Airborne Bistatic Radar, ABR) 由于其优良的“四抗”性能而倍受人们重视, 然而 ABR 面临很强的空时耦合地面杂波干扰, 杂波谱展宽严重, 因此杂波抑制是机载双基地雷达的关键难题之一^[1,2]. 空时自适应处理是一项新的杂波抑制技术, 然而对于 ABR, 由于收发分置造成杂波具有很强的距离非均匀性^[3], 而且 ABR 作用距离较远, 特别是超高空机载双基地雷达 (例如临近空间无人机载双基地雷达), 一般都存在大量的距离模糊杂波. 模糊杂波的存在, 加剧了杂波的距离非均匀性, 使得许多传统的杂波距离非均匀补偿方法性能大受影响甚至失效. 因此, 抑制 ABR 模糊杂波, 对杂波进行距离相关性补偿, 对于提高机载双基地 STAP 性能具有重要意义.

对于模糊杂波, 文献[4]提出了一种基于俯仰自适应置零天线技术的抑制方法, 但是这种方法需要三维空

时采样, 这将使设备变得复杂, 运算量增大. 基于正交投影 (Orthogonal Projection, OP) 变换对回波数据进行预处理, 可以有效消除模糊杂波, 而且不需要增加维度^[3].

文献[5,6]各自提出了一种基于杂波空间导向矢量的机载单基地雷达杂波正交投影预处理算法, 以实现模糊杂波抑制, 但文献[5]的 OP 算法不能直接应用到 ABR, 因为 ABR 空间多普勒频率与时间多普勒频率之间没有机载单基地雷达那样的简单关系. 文献[6]的 OP 矩阵构造方法简单, 但是由于各次模糊杂波的时间多普勒频率相差不大, 构造的 OP 矩阵奇异, 无法进行运算处理. 对于 ABR 模糊杂波, 尚无成熟的 OP 算法可用.

多普勒频移 (Doppler Warping, DW) 法主要用来解决非正侧面阵、共形阵和双(多)基地机载雷达中杂波距离相关性^[1,5,6]. 通过对不同距离门回波的多普勒频率进行修正以补偿其距离非均匀性, 属于一维多普勒搬移, 实现方法简单, 但是效果有限, 且只能用于没有距离模糊的情况.

本文提出了一种正交投影-多普勒频移(Orthogonal Projection-Doppler Warping, OP-DW)算法.该算法首先利用待检测距离环杂波的空间、时间多普勒频率信息构造空间、时间 OP 矩阵,重构杂波数据,消除模糊杂波,然后对新杂波数据采用 DW 法补偿杂波样本间的距离非均匀性,从而提高杂波质量,提高机载双基地雷达 STAP 性能.

2 正交投影-多普勒频移预处理算法

2.1 机载双基地 STAP 模型

以双基地接收站在水平面的投影为原点 o 建立 ABR 直角坐标几何模型如图 1 所示. θ_{v_T} 、 θ_{v_R} 分别为 ABR 发射站 T、接收站 R 相对于基线的航向角; (θ_T, φ_T) 、 (θ_R, φ_R) 分别为发射波束、接收波束的方位角和俯仰角; v_T 、 v_R 分别为 T、R 站的航速, l 为双基地基线 L 在水平面的投影,且 $l = \sqrt{L^2 - (H_T - H_R)^2}$; R_T 、 R_R 分别为发射、接收天线相位中心与杂波散射点之间的距离; R'_T 、 R'_R 分别为 R_T 和 R_R 在水平面的投影; H_T 、 H_R 分别为 T、R 站的高度.

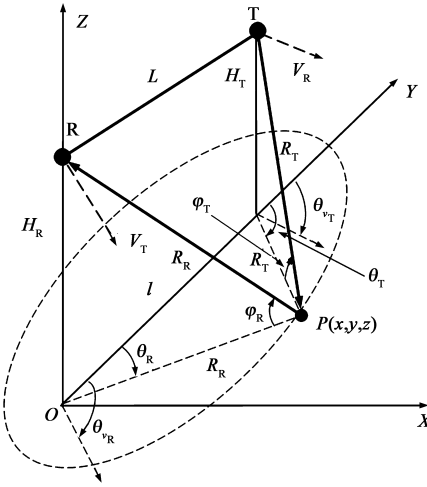


图1 机载双基地雷达几何关系

影响 ABR 杂波特性的主要因素有四个:杂波单元反射率模型、杂波幅度分布形式、杂波频谱结构及雷达系统参数^[6],综合以上因素,考虑距离模糊回波,采用文献^[6]的空时二维杂波模型.得第 n 个接收单元第 k 次采样的杂波信号为:

$$c(n, k) = \sum_{\kappa=1}^K \int_0^{\pi} \frac{\sqrt{GF}(\theta_T, \varphi_{T\kappa}) g(\varphi_{R\kappa}) \sigma_c}{R_T R_R} \cdot a_{i\kappa} e^{j\Phi} X_{\kappa} e^{j(n-1)\omega_s + j(k-1)\omega_t} d\theta_R \quad (1)$$

其中, G 为雷达系统参数^[7], $F(\theta_T, \varphi_{T\kappa})$ 、 $g(\varphi_{R\kappa})$ 分别为发射和接收方向图,对于 M 行 N 列的发射、接收面阵天线,发射方向图是针对整个面阵进行微波合成,接收方向图是针对列阵进行微波合成^[8], σ_c 为地、海杂波

的雷达散射截面积, Φ 为随机相位, $a_{i\kappa}$ 为满足某种分布模型的杂波随机幅度序列. ω_s 、 ω_t 分别为杂波的空域、时域角频率^[6].

设有 N 个天线阵元进行空域滤波,一个相关处理间隔中包含 K 个脉冲,则雷达接收某个距离门的空时采样信号可用数据矩阵 $X_{N \times K}$ 表示.杂波的全空时二维自适应处理可以转化为式(2)所示的数学优化问题^[8].

$$\begin{cases} \min & \mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W} \\ \text{s.t.} & \mathbf{W}^H \mathbf{S} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中, \mathbf{R} 为 $NK \times NK$ 维杂波协方差矩阵, \mathbf{S} 为空时二维导向矢量.

由式(2)计算得到空时二维最优处理器的权矢量 \mathbf{W}_{opt} 为:

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mu \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S} \quad (3)$$

其中, μ 为常数.

描述 STAP 性能的一个重要参数为杂波改善因子 (I),其定义为:

$$I = \mathbf{S}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S} \frac{P_{c \text{ in}}}{P_{s \text{ in}}} \quad (4)$$

其中 $P_{c \text{ in}}$ 和 $P_{s \text{ in}}$ 分别为输入杂波、信号的功率.

2.2 正交投影

如果解决了矩阵奇异的问题,则文献^[6]的 OP 算法可应用到 ABR 中来.相对近距离杂波,ABR 远距离模糊杂波谱线在方位-多普勒平面上基本处于同一位置,可近似看作是均匀的,即各模糊杂波的波特性可以由某一模糊杂波特性代替^[9],文献^[6]中的模糊杂波子空间矩阵变为列向量,从而避免了矩阵奇异问题.然而仿真发现,只利用杂波的空间角频率信息构造 OP 矩阵,会同时抑制给定方位的模糊杂波和采样门的非模糊杂波,没有将二者有效区分开来,还造成杂波谱进一步展宽,无性能改善可言.

观察发现,ABR 杂波的空间和时间角频率都包含俯仰信息,通过二者可以完全区分不同方位、距离的杂波.因此,利用 ABR 非模糊杂波的空时二维角频率信息可以将各采样距离门中的非模糊杂波准确提取出来,组成新的杂波数据,从而消除模糊杂波.

假设对于第 x 个采样距离门,任意给定接收机方位角 θ_{xi} , $0 \leq \theta_{xi} \leq 2\pi$,对应的非模糊杂波俯仰角为 φ_1 .根据正交投影理论,首先构造 (θ_{xi}, φ_1) 对应杂波散射单元的空域和时域投影矩阵如式(5)、(6):

$$\mathbf{P}_s = \mathbf{A}_s(\theta_{xi}, \varphi_1) (\mathbf{A}_s(\theta_{xi}, \varphi_1)^H \mathbf{A}_s(\theta_{xi}, \varphi_1))^{-1} \mathbf{A}_s(\theta_{xi}, \varphi_1)^H \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_t = \mathbf{B}_t(\theta_{xi}, \varphi_1) (\mathbf{B}_t(\theta_{xi}, \varphi_1)^H \mathbf{B}_t(\theta_{xi}, \varphi_1))^{-1} \mathbf{B}_t(\theta_{xi}, \varphi_1)^H \quad (6)$$

其中,

$$\mathbf{A}_s(\theta_{xi}, \varphi_1) = [1, e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} \cos \theta_{xi} \cos \varphi_1}, \dots, e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} (N-1) \cos \theta_{xi} \cos \varphi_1}]^T$$

$$\mathbf{B}_i(\theta_{xi}, \varphi_1) = [1, e^{j2\pi \frac{f_d(\theta_{xi}, \varphi_1)}{f_r}}, \dots, e^{j2\pi (K-1) \frac{f_d(\theta_{xi}, \varphi_1)}{f_r}}]^T$$

其次,由式(5)、(6)所示空域、时域 OP 矩阵从原始杂波数据中提取符合特征的非模糊杂波分量如式(7):

$$\mathbf{Y}_{x, \theta_{xi}} = \mathbf{P}_i(\theta_{xi}, \varphi_1) \mathbf{X}_x^T \mathbf{P}_s^T(\theta_{xi}, \varphi_1) \quad (7)$$

对 $(0 \sim 2\pi)$ 方位内经过空时级联 OP 处理的杂波数据求和,即构成第 x 采样门的非模糊杂波数据。

$$\mathbf{Y}_x = \sum_{\theta_{xi}=0}^{2\pi} \mathbf{Y}_{x, \theta_{xi}} \quad (8)$$

式(5)~(8)所示的 OP 算法没有使用模糊杂波的空时角频率信息,因此这种方法通用性很强,适用于具有不同数量模糊杂波的空基、天基等多种平台双基地雷达。

需要指出的是,此方法不能抑制从法向进入的模糊杂波,因为对于接收天线阵面法向, \mathbf{A}_x 、 \mathbf{B}_x 中的元素全为 1,无法体现俯仰信息,从而无法区分模糊与非模糊杂波。但是,从法向泄露的少量模糊杂波并不对本 OP 算法的效果构成明显影响。

2.3 多普勒频移

原始杂波通过 OP 处理,消除了模糊杂波,因而可以采用 DW 法继续进行处理,补偿杂波距离相关性,进一步提高杂波质量。对于 ABR 第 x 个采样门,构造多普勒频移矩阵 $\mathbf{H}^{[7]}$,则对杂波 DW 补偿处理如式(9):

$$\mathbf{Z}_x = \mathbf{H} \mathbf{Y}_x \quad (9)$$

经过 DW 处理后,各采样门的杂波距离相关性得到一定程度补偿,更接近于参考门的杂波特性,提高了杂波协方差矩阵的估计精度,改善了 STAP 抑制 ABR 杂波的能力。

2.4 正交投影-多普勒频移

将 OP 算法和 DW 算法级联起来,即构成 ABR 杂波的正交投影-多普勒频移(OP-DW)预处理算法,它既可以抑制 ABR 模糊杂波,又对其杂波距离相关性进行补偿。

OP-DW 算法的联合顺序是确定的,不能颠倒过来,因为如果先进行 DW 处理,近距离非模糊距离环中各采样门的杂波相关性得到补偿,但原本近似均匀的远距离模糊杂波却变得非均匀,而且 DW 处理会缩小各模糊杂波与非模糊杂波空时角频率间的差别,从而降低了 OP 处理对模糊杂波分量的识别分选

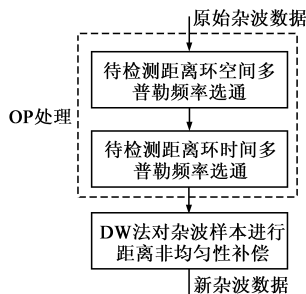


图2 OP-DW预处理算法原理示意图

能力,降低了处理效果。图2是 OP-DW 算法的原理示意图。

3 多种几何场景下 OP-DW 性能分析

ABR 具有多种飞行几何场景,不同的几何场景下的杂波特性各不相同。在图1所示坐标系下,典型的 ABR 几何场景有直线、平行、垂直、交叉四种^[10],如图3所示,其参数为:直线(场景一): $\theta_T = 0^\circ, \theta_R = 0^\circ$;平行(场景二): $\theta_T = 90^\circ, \theta_R = 90^\circ$;垂直(场景三): $\theta_T = 0^\circ, \theta_R = 90^\circ$;交叉(场景四): $\theta_T = 45^\circ, \theta_R = 135^\circ$ 。

假设 ABR 收、发天线为 8 行 8 列的矩形正侧面阵,阵元间距为 $\lambda/2$,天线主波束指向 $(0^\circ, -20^\circ)$,行、列子阵采用 20dB 切比雪夫加权。载机高度 30km,水平匀速直线运动,

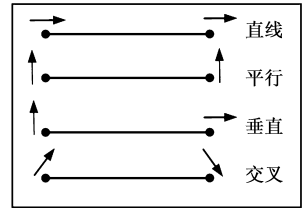


图3 几种典型的ABR几何场景

速度为 140m/s。雷达波长 0.23m,发射机功率 200kW,接收机噪声系数 3.5dB,带宽 7MHz,距离分辨率为 150m,脉冲重复频率 2434.8Hz,脉冲采样数为 8。地面环境类型为“农田”,杂波幅度符合对数-正态分布,参数取值为 $p = 0.5, q = 1.2$,杂波频谱符合高斯分布。分析在不同几何场景下 OP-DW 算法对 STAP 的改善效果如下。

图4是场景一机载双基地雷达 OP-DW 预处理效果图。图中实线“—”,虚线“- -”,点线“...”和星号线“- * ”分别表示 ABR 杂波未经任何预处理、经过 DW、OP 和 OP-DW 预处理后的 STAP 改善因子。图中显示,四者凹口宽度大小为: NONE > DW > OP > OP-DW,这表明 DW、OP 和 OP-DW 都对机载双基地雷达 STAP 性能有改善效果,而且 OP-DW 的改善效果最好,OP 次之,DW 最弱。另外还可以看到,含有 OP 的预处理方法(OP/OP-DW)对机载双基地杂波 STAP 性能的改善程度要明显大于单纯 DW 法,这表明 OP 处理可有效消除模糊杂波,改善杂波质量,而 OP-DW 综合二者的功能,对 STAP 的改善效果更好。

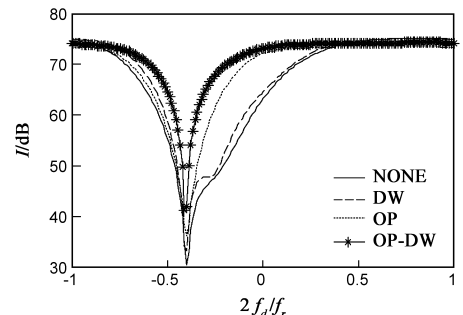


图4 ABR杂波OP-DW预处理效果图(场景一)

图 5 是场景二机载双基地雷达 OP-DW 预处理效果图.可以看到,图中的四条 I 曲线,“NONE”与“DW”基本重合,“OP”与“OP-DW”基本重合,这是由于收、发都为正侧面阵,而主波束指向为 90° ,此时各距离门参考点的多普勒频率都为零,DW 失去补偿能力.但 OP 仍然有效,此时 OP-DW 算法对杂波 STAP 性能仍有明显改善.

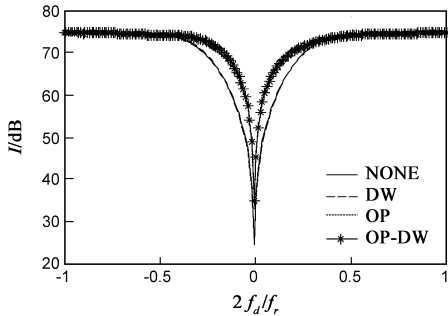


图5 ABR杂波OP-DW预处理效果图(场景二)

图 6 是场景三机载双基地雷达 OP-DW 预处理效果图.此时各距离门的参考频率近似相等,DW 对 ABR 杂波 STAP 性能改善很小,但是 OP-DW 对 ABR 杂波 STAP 性能改善仍很明显,且比单纯 OP 处理的效果还有一定改善.



图6 ABR杂波OP-DW预处理效果图(场景三)

图 7 是场景四机载双基地雷达 OP-DW 预处理效果图.从图看到,OP-DW 对含有模糊杂波的非均匀 ABR 杂波 STAP 性能具有最好的改善效果,相比“NONE”,其改善效果相当可观,就是对于单纯 OP 处理,OP-DW 的改善效果也具有明显的提高.

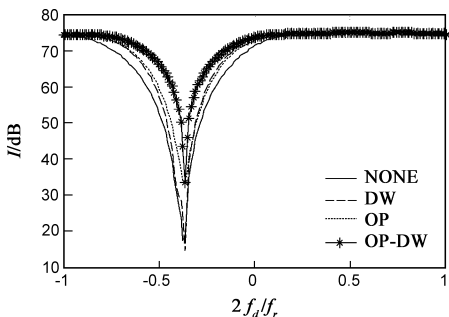


图7 ABR杂波OP-DW预处理效果图(场景四)

对比图 4~7 可以看到,OP-DW 预处理算法适应双基地几何场景的能力最强,只是在部分特殊几何场景下,OP-DW 退变为单纯的 OP 处理.因此,在任意几何场景下,OP-DW 对含有模糊回波的 ABR 非均匀杂波 STAP 总是具有最好的改善效果,即在任何几何场景下,OP-DW 算法的效果总是:OP-DW \geq OP $>$ DW \geq NONE.

4 结论

本文提出了一种 OP-DW 算法,以实现对正侧视 ABR 模糊杂波抑制和距离非均匀性补偿,在不同几何场景下仿真分析了其性能.仿真表明:OP-DW 算法对 ABR 任意几何场景具有良好的适应能力,可明显改善 STAP 性能,而且 OP-DW 算法无需模糊杂波信息即可实现模糊杂波抑制,适用于不同动平台的雷达系统,具有较大的优越性.

参考文献

- [1] 王永良.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,(6):271-276.
WANG Yong-liang. Overview and outlook of space time adaptive signal processing for airborne radar[J]. Journal of CAEIT. 2008, (6): 271-276. (in Chinese)
- [2] 魏进武,王永良,陈建文.双基地机载预警雷达空时自适应处理方法[J].电子学报,2001,(12A):1936-1939.
WEI Jin-wu, WANG Yong-liang, CHEN Jian-wen. Space-time adaptive processing approaches to bistatic airborne early warning radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, (12A): 1936-1939. (in Chinese)
- [3] RICHARD KLEMM. Principles of Space-Time Adaptive Processing [M]. London: The Institution of Electrical Engineers, 2002. 64-87.
- [4] HALE T B, Temple M A, Raquet J F, et al. Localised three-dimensional adaptive spatial-temporal processing for airborne radar[J]. Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings, 2003, 150(1): 18-22.
- [5] 王万林.非均匀环境下的相控阵机载雷达 STAP 研究[D].西安:西安电子科技大学,2004.44-56.
WANG Wan-lin. Study on STAP for Phased Array Airborne Radar in Nonhomogeneous Environment[D]. Xi'an: Xidian University, 2004. 44-56. (in Chinese)
- [6] 谢文冲.非均匀环境下的机载雷达 STAP 方法与目标检测技术[D].长沙:国防科技大学,2006.15-36.
XIE Wen-chong. STAP and Target Detection Technique for Airborne Radar in Nonhomogeneous Environments[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. 15-36. (in Chinese)
- [7] 冯坤菊.临近空间双基地雷达系统研究[D].西安:空军工程大学,2009.37-59.

FENG Kun-ju. Research on Near Space Bistatic Radar System [D]. Xi'an: AFEU, 2009. 37 - 59. (in Chinese)

- [8] 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, 1999. 26 - 45.

WANG Yong-liang, PENG Ying-ning. Space-Time Adaptive Processing [M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 1999. 26 - 45. (in Chinese)

- [9] 吴洪. 非均匀杂波环境下相控阵机载雷达 STAP 技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007. 31 - 33.

WU Hong. STAP for Nonhomogeneous Clutter Suppression in Phased Array Airborne Radar[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. 31 - 33. (in Chinese)

- [10] 韩丽娟. 双基地机载雷达杂波空时自适应处理[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008. 17 - 23.

HAN Li-juan. Researching of Clutter Suppression in Bistatic Airborne Radar Systems[D]. Xi'an: Xidian University, 2008. 17 - 23. (in Chinese)

作者简介



冯坤菊 男, 1985 年 9 月出生于湖南省临澧县, 2009 年毕业于空军工程大学雷达工程系, 现为 95059 部队助理工程师, 主要研究方向为雷达电子战及临近空间军事.

E-mail: fengkunju.student@sina.com



王春阳 男, 博士, 1967 年 2 月出生于河南省新野县, 空军工程大学导弹学院副教授, 主要研究方向为雷达电子战.

E-mail: wey1967326@163.com