

一种改进的机载双基雷达多普勒频移算法

赵 军^{1,2}, 沈明威³, 朱岱寅¹, 赵建洋⁴

(1. 南京航空航天大学 电子信息工程学院, 江苏 南京 210016; 2. 空军第一航空学院, 河南 信阳 464000; 3. 河海大学 计算机与信息学院, 江苏 南京 211000; 4. 淮阴工学院 计算机工程学院, 江苏 淮安 223003)

摘 要: 机载双基雷达由于载机之间的相对运动, 造成其杂波分布随距离变化而变化, 直接导致杂波协方差矩阵估计不准确, 进而使得空时自适应处理技术的杂波抑制和动目标检测性能下降. 提出一种杂波非均匀补偿技术, 该方法先采用多普勒频移预处理, 使得主波束方向上的杂波谱重合, 然后通过多个空间角方向上的归一化多普勒频率进行补偿, 使各距离单元的杂波谱保持一致. 仿真结果表明该方法能有效改善机载双基雷达的杂波非均匀情况, 性能明显优于原有算法.

关键词: 机载双基雷达; 多普勒频移; 杂波抑制; 空时自适应处理

中图分类号: TN951 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2015.02.017

0 引言

机载双基雷达将发射系统和接收系统分别置于相隔一定距离的两个独立载机平台上, 一般采用“远发近收”的工作模式, 将发射机布置在远离战场的后方区域, 保证发射机的安全, 而将处于静默状态的接收机安装在无人机上并部署于前线空域或密切关注区域, 与单基雷达相比, 不仅提高了雷达自身的生存能力, 而且对隐身目标的探测具有独特优势, 因此, 对机载双基雷达的研究受到了广泛的重视^[1-2]. 双基雷达系统最大的难题是如何对付比单基情况下更加复杂、严重的地面杂波干扰, 进而检测出“淹没”在其中的低速运动目标. 空时自适应处理技术 (Space Time Adaptive Processing, STAP) 同时联合时域和空域进行二维自适应滤波, 可以有效滤除地面杂波干扰, 提高机载雷达对地面动目标的检测能力^[3-4]. STAP 技术要求杂波是广义平稳 (均匀) 的, 否则将导致杂波协方差矩阵估计不准确, 影响系统的杂波抑制性能和动目标检测能力, 因此, 将 STAP 技术引入机载双基雷达的杂波抑制, 关键要解决机载双基雷达杂波在距离向分布的非均匀问题.

针对机载雷达杂波分布在距离向非均匀问题, 国内外的研究成果主要有四类. ①局域处理

类. 如三通道联合自适应处理 (3DT) 法, 局域联合处理法 (JDL) 等^[5-6], 该方法通过降维处理减小处理器的维数, 从而达到减少训练样本数据的目的, 但训练样本数目减少与杂波协方差矩阵精确的矛盾导致这类方法性能较差. ②杂波补偿类算法. 如多普勒频移 (DW) 法^[7], 角度-多普勒补偿 (ADC) 法^[8], 该类技术通过平移, 使训练单元和待检测单元的杂波谱在某一点重合, 通过提高杂波谱的“相似性”以减少非均匀程度. 但杂波非均匀是在整个空时平面内的, 尽管在某一点重合, 在其余方向上的杂波非均匀依然存在. ③内插变换类方法. 主要包括空时内插法和联合空时内插 (STINT) 法^[9-10], 该类方法把各训练单元的杂波数据变换到待检测单元的杂波子空间, 从而达到消除杂波分布非均匀的目的, 该方法计算变换矩阵的运算量与杂波自由度成正比, 所需的运算量巨大. ④权值扩展类算法. 主要包括基于导数更新 (DBU) 法及其改进算法^[11-12], 该类方法的假设前提是权矢量为距离单元数的线性函数, 通过对样本数据进行扩展, 降低杂波非均匀的程度, 但该方法所需训练样本数目需增加一倍.

笔者研究了机载双基雷达杂波抑制和动目标检测问题, 提出了一种改进的杂波非均匀补偿技术, 该方法先通过多普勒频移预处理, 使各距离单

收稿日期: 2014-10-09; 修订日期: 2014-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61201459; 61301210); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2012408; BK20130815)

作者简介: 赵军 (1974-), 男, 河南新蔡人, 南京航空航天大学博士后, 研究方向为空时自适应信号处理.

元的杂波在波束指向中心重合,消除在主波束方向的非均匀,然后采用多空间角补偿的方法,使得训练样本和待检测样本的杂波在多个方向上一致,减小在旁瓣方向的杂波非均匀.仿真结果表明了该算法的有效性.

1 机载双基雷达杂波特性

机载双基雷达几何配置如图 1 所示,以接收机在地面的投影为空间直角坐标系中心,建立空间坐标系.图中 H_T, H_R 分别表示发射平台 T_x 和接收平台 R_x 的载机飞行高度; v_T, v_R 分别表示发射、接收平台的飞行速度; L 为双基地的基线长度; α_T, α_R 分别表示发射、接收平台载机飞行方向相对于基线的方位角; φ_T 和 φ_R 分别表示地面杂波散射单元 P 相对于发射、接收平台仰俯角; ψ_T, ψ_R 分别表示地面杂波散射单元相对于发射、接收平台载机飞行方向的空间锥角; θ_T 和 θ_R 分别表示发射、接受天线波束指向相对于基线方向的方位角; R_T 和 R_R 分别表示发射、接收平台到杂波散射单元的距离,收发距离之和即为双基探测距离 R_s ,空间中所有到发射平台 T_x 和接收平台 R_x 距离之和相等的点的集合构成一等距离椭球体.

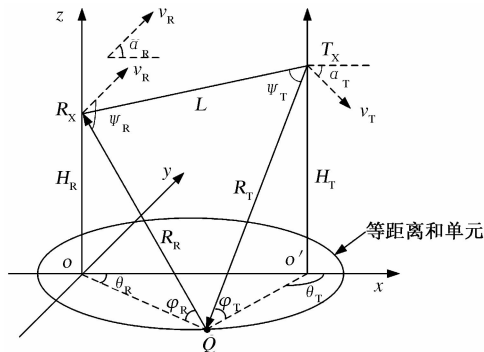


图 1 机载双基雷达几何配置关系图
Fig. 1 Geometry of airborne bistatic radar

接收回波信号的多普勒频率为

$$f_d = \frac{v_R}{\lambda} \cos \psi_R + \frac{v_T}{\lambda} \cos \psi_T, \tag{1}$$

式中: λ 为雷达工作波长;接收锥角和发射锥角的余弦满足

$$\begin{cases} \cos \psi_R = \cos \varphi_R \cos (\theta_R - \alpha_R) \\ \cos \psi_T = \cos \varphi_T \cos (\theta_T - \alpha_T) \end{cases} \tag{2}$$

根据图 1 所示的几何关系,经整理可以得到

$$f_d = \frac{v_R}{\lambda} \cos \varphi_R \cos (\theta_R - \alpha_R) + \frac{v_T}{\lambda} \cos \varphi_T \cos (\theta_T - \alpha_T), \tag{3}$$

由式(3)可以看出,其它参数确定条件下,可将多

普勒频率 f_d 表示成关于空间锥角 $\cos \psi_R$ 的函数,进而建立归一化多普勒频率 $2f_d/f_r$ 与 $\cos \psi_R$ 的对应关系.笔者选取 6 种典型几何配置进行仿真,如图 2 所示.图中左边为接收载机,右边为发射载机,且飞行方向与基线夹角均为 45° 的整数倍.分别取双基距离和分别为 153 km, 253 km 和 353 km,得到 6 种典型几何配置条件下,杂波谱在 $2f_d/f_r \sim \cos \psi_R$ 平面内的空时分布如图 3 所示.



图 2 机载双基雷达典型几何配置结构图
Fig. 2 Typical cases of airborne bistatic radar geometry

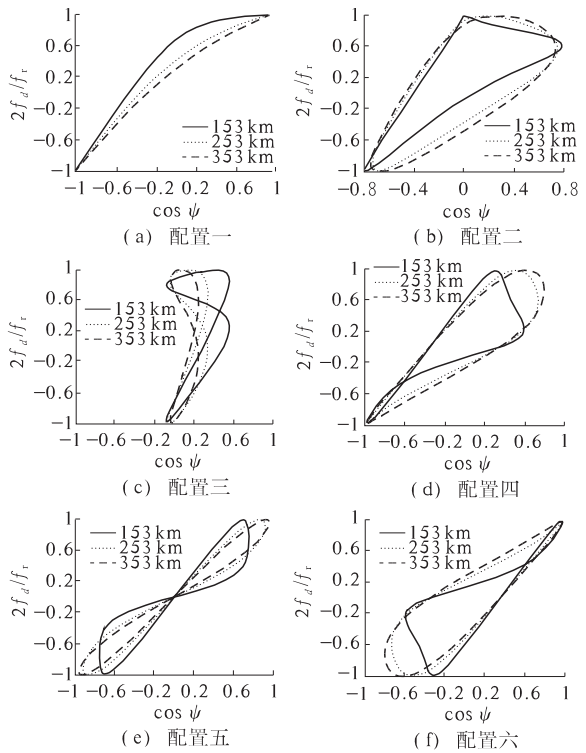


图 3 不同距离和条件下机载双基雷达杂波谱分布
Fig. 3 Angle-Doppler traces comparison of airborne bistatic radar

由图 3 可以看出,不同几何配置条件下,双基机载雷达杂波谱的空时分布都随距离和的变化而变化,不同距离单元杂波谱的空时分布不同,即杂波在距离向是非均匀的.单基地正侧视配置条件下,由于杂波在距离向是均匀的,因此可以用距离平均代替统计平均.双基雷达杂波不满足独立同分布条件,直接平均将导致杂波谱在空时二维平面上严重扩散,直接影响杂波协方差矩阵估计的

准确性,为确保估计的有效性,在进行统计平均之前,需要采用必要的补偿技术。

2 多普勒频移预处理

假定待检测单元为第0单元,它对应的仰角为 $\varphi_{R,0}$,从待检测单元两侧各取 L 个距离单元的回波数据作为训练样本,各单元对应的仰角分别为 $\varphi_{R,l}, l = -L, \dots, -1, 1, \dots, L$ 。

定义归一化的多普勒频率

$$\bar{f}_d = 2f_d/f_r. \quad (4)$$

固定接收天线主波束指向的空间锥角为 $\cos \psi_R$, 根据公式(3)得到第 l 个训练单元与第0个参考单元的归一化多普勒频率之差

$$\Delta \bar{f}_{d,l} = \bar{f}_{d,l} - \bar{f}_{d,0}, \quad (5)$$

第 l 训练单元 DW 法的补偿因子

$$\mathbf{T}_{DW,l} = \mathbf{T}_{t,l} \otimes \mathbf{I}_N, \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{T}_{t,l} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{j2\pi\Delta\bar{f}_{d,l}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & e^{j2\pi(K-1)\Delta\bar{f}_{d,l}} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

\mathbf{I}_N 是 $N \times N$ 阶单位矩阵。

将补偿因子作用于第 l 个单元的样本数据 \mathbf{X}_l , 得到经 DW 法补偿后的训练样本

$$\mathbf{X}_{DW,l} = \mathbf{T}_{DW,l}^H \mathbf{X}_l, \quad (8)$$

DW 算法的原理如图4所示。

经过多普勒补偿预处理后,训练单元杂波谱和待检测单元的杂波谱在主波束方向一致,减小了杂波分布的离散程度。由图3可以看出,机载双基雷达的杂波非均匀是全方位的,多普勒补偿预处理消除了主波束方向的杂波非均匀,但在旁瓣方向的杂波非均匀依旧存在,为此,提出一种改进的多普勒频移法。

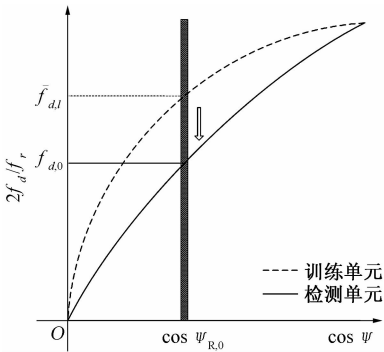


图4 DW 算法原理图

Fig.4 Principle of DW method

3 改进的多普勒频移法

将经过多普勒补偿处理后的样本数据 $\mathbf{X}_{DW,l}$ 重排为一 $N \times K$ 维矩阵,并沿矩阵各行做 FFT,得变换后的样本矩阵 $\mathbf{X}'_{DW,l}$ 。在主波束方向两侧各取 P 个空间角方向,假定第 p 个方向的空间锥角余弦为 $\cos \psi_{R,p}$,根据公式(3)得到与之对应的归一化多普勒频率 $\bar{f}_{d,lp}, p = -P, \dots, -1, 0, 1, \dots, P$ 。

对第 l 个单元进行补偿时,第 p 个空间锥角方向,第 l 个单元与第0个单元的归一化多普勒频率之差

$$\Delta \bar{f}_{d,lp} = \bar{f}_{d,lp} - \bar{f}_{d,l0}, \quad (9)$$

对于所有 P 个空间角方向,第 l 个单元的补偿因子

$$\mathbf{T}_{MDW,l} = \begin{bmatrix} 1 & e^{j\pi\Delta\bar{f}_{d,l1}} & \dots & e^{j\pi(K-1)\Delta\bar{f}_{d,l1}} \\ 1 & e^{j\pi\Delta\bar{f}_{d,l2}} & \dots & e^{j\pi(K-1)\Delta\bar{f}_{d,l2}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & e^{j\pi\Delta\bar{f}_{d,lP}} & \dots & e^{j\pi(K-1)\Delta\bar{f}_{d,lP}} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

经多空间角方向补偿后的样本矩阵

$$\mathbf{X}'_{MDW,l} = \mathbf{T}_{MDW,l} \odot \mathbf{X}'_{DW,l}, \quad (11)$$

式中“ \odot ”表示 Hadamard 内积。

对矩阵 $\mathbf{X}'_{MDW,l}$ 各行向量做 IFFT,并将其还原为 $NK \times 1$ 维样本数据 $\mathbf{X}_{MDW,l}$,对 $\mathbf{X}_{MDW,l}$ 用常规 STAP 技术进行处理就可实现对杂波和干扰的抑制,把这种先进行 DW 预处理,然后通过二次补偿来减小杂波非均匀程度的方法称为改进的多普勒频移法 (Modified DW, MDW),其原理如图5所示。

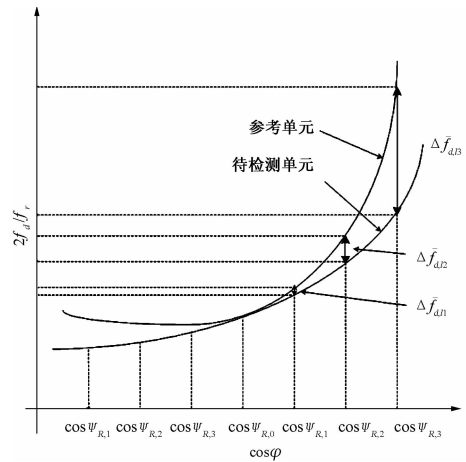


图5 MDW 法原理图

Fig.5 Principle of MDW method

4 仿真研究

假定机载双基雷达天线阵元数 $N = 8$, 相干处理脉冲数 $K = 8$, 基线距离 $L = 100$ km, 双基距离和 $R_s = 253$ km, 发射载机和接收载机平台高度分别为 8 km 和 6 km, 发射、接收载机飞行速度均为 140 m/s, 雷达工作波长 $\lambda = 0.23$ m, 阵元间距为波长的二分之一, 脉冲重复频率 $f_r = 2\ 234$ Hz, 单元输入杂噪比为 50 dB, 不考虑距离模糊问题. MDW 法中, 补偿通道数 $P = 8$. 为减小训练样本数目, 对各算法补偿或扩展后的杂波协方差矩阵用 3DT 法进行降维处理, 其中 DW 法、ADC 法、STINT 法训练样本数为 48, DBU 和 EDBU 法训练样本数为 96, 得到机载双基雷达距离依赖性补偿算法的改善因子和杂波谱比较如图 6 和 7 所示, OPT 代表假定杂波协方差矩阵已知, SMI 表示各距离单元杂波数据直接进行统计平均, 未经任何补偿处理.

由于机载双基雷达的各距离单元杂波谱空时分布不重合, 3DT 法未经任何补偿处理, 直接进行统计平均将导致杂波谱展宽严重. 经 DW 法补偿处理后, 各距离单元杂波在主波束方向重合, 在该方向的杂波非均匀程度得到明显改善, 杂波谱变“窄”, 而且其它方向上, 杂波谱改善不明显, 如图 7(e). MDW 法由于在多个空间角方向上对杂波谱的非均匀进行了补偿, 各方向杂波谱的离散程度都得到明显改善, 因此在整个空时平面内, 杂波谱都明显变窄, 其改善因子无论在主波束方向, 还是旁瓣方向都比 3DT 有明显提高, 也优于 DW 法, 如图 7(b), 其平均改善因子比 DW 法好约 4.42 dB, 也优于 DBU 法、STINT 等其它典型补偿类算法, 见图 6.

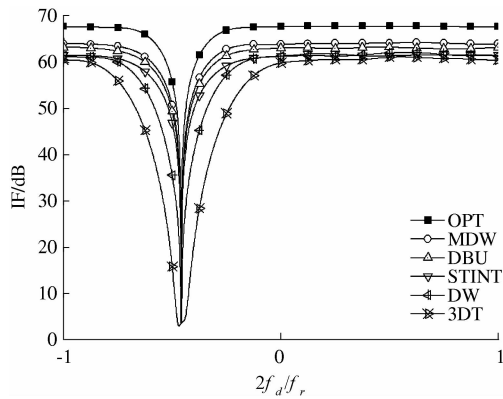


图 6 机载双基雷达补偿类算法改善因子

Fig. 6 IF comparison of compensation methods for airborne bistatic radar

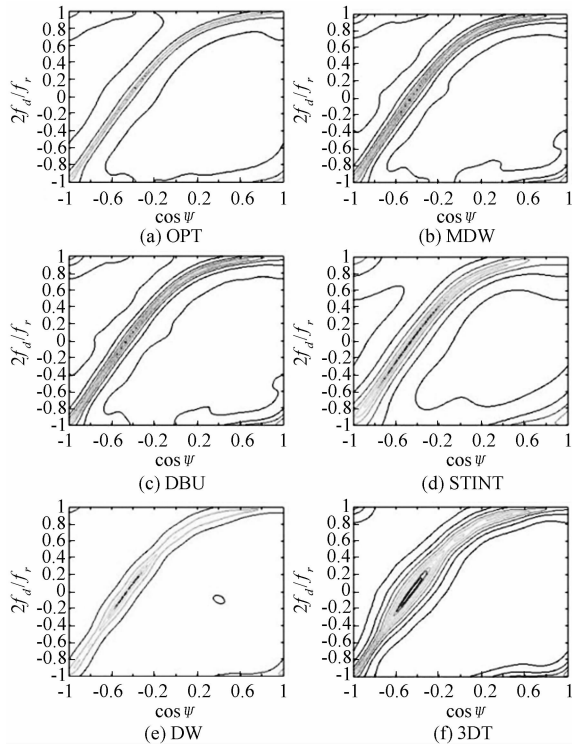


图 7 机载双基雷达补偿类算法杂波谱

Fig. 7 MVDR spectra comparison of compensation methods for airborne bistatic radar

5 结论

笔者研究了机载双基雷达的杂波抑制问题, 提出了一种改进的多普勒频移方法以改善双基雷达杂波的非均匀程度, 与原有方法相比, 该方法在多个空间角方向上使训练单元和待检测单元的杂波谱保持一致, 性能有明显优于传统的补偿类方法, 具有工程应用价值.

参考文献:

[1] 陈国海. 下一代预警机雷达技术[J]. 现代雷达, 2010, 32(3): 1-4.

[2] 杨振起, 张永顺, 骆永军. 双(多)基地雷达系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

[3] MELVIN W L. A STAP overview[J]. IEEE AES Magazine, 2004, 19(1): 19-35.

[4] LAPIERRE F D, VERLY J G. Framework and taxonomy for Radar space-time adaptive processing (STAP) methods[J]. IEEE Trans on AES, 2007, 43(3): 1084-1099.

[5] 保铮, 廖桂生, 吴仁彪, 等. 相控阵机载雷达杂波抑制的时空二维自适应滤波[J]. 电子学报, 1993, 21(9): 1-7.

[6] WANG Hong, CAI Lu-jing. On adaptive spatial-temporal processing for airborne surveillance radar systems

- [J]. IEEE Trans. on AES, 1994,30(3):660-670.
- [7] BORSARI G K. Mitigating effects on STAP processing caused by an inclined array[C]//Proc. of the IEEE National Radar Conf, Dallas, TX, 1998: 135-140.
- [8] HIMED B, ZHANG Y, HAIJARI, et al. STAP with angle-Doppler compensation for bistatic airborne radars [C]//Proc. of 2002 IEEE Radar Conf, Long Beach, CA, 2002: 22-25.
- [9] VARDARAJAN V, KROLIK J L. Joint space-time interpolation for distorted linear and bistatic array geometries[J]. IEEE Trans. On SP, 2006, 56(3): 848-860.
- [10] 彭晓瑞, 谢文冲, 王永良. 一种基于空时内插的双基地机载雷达杂波抑制方法[J]. 电子与信息学报, 2010,32(7):1697-1702.
- [11] ZATMAN M. Circular array STAP[C]//Proc. of the IEEE National Radar Conf., Boston, April 1999: 108-113.
- [12] KOGON S M, ZATMAN M A. Bistatic STAP for airborne radar systems[C]//ASAP Workshop MIT Lincoln Laboratory, Lexington, 2001.

An Improved Doppler Warping for Airborne Bistatic Radar

ZHAO Jun^{1,2}, SHEN Ming-wei³, ZHU Dai-yin¹, ZHAO Jian-yang⁴

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. The First Aeronautical Institute of Air force, Xinyang 464000, China; 3. College of Computer & Information, Hohai University, Nanjing 211100, China; 4. College of Computer, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, China)

Abstract: The clutter distribution of airborne bistatic radar varie with ranges due to the relative motion between the transmitter and the receiver and the covariance matrix estimation is no longer accuate, so that the statistical STAP methods degrade. In this paper, a new clutter compensation algorithm for airborne bistatic radar is proposed. This method involves first a pre-processing with Doppler warping method to bring the clutter spectra together in the deriction of main beam and subquently Doppler compensation of different range gates in the direction of multiple space angels. Simulation results show the proposed method can reduce the clutter nonhomogeneity of bistatic radar effectively and is spuerial to the traditional compensation methods.

Key words: airborne bistatic radar; doppler warping; clutter suppression; space time adaptive processing