

非正侧视阵机载雷达杂波抑制算法研究

龚清勇 朱兆达

(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

摘要: 非正侧视阵机载雷达的空时二维杂波谱随距离的变化而变化,即在距离维是非均匀的,因此不能直接由邻近距离单元估计杂波协方差矩阵。为了解决这种由距离依赖性引起的杂波特别是近程杂波的非均匀问题,该文对多普勒频移算法进行了改进,将经过多普勒频移补偿后的数据转换到阵元-多普勒域,在多普勒域进行空间频率补偿,提高其在主杂波区的性能。改进算法既充分利用了原算法简单,易于实现的特点,又克服了原算法在大偏航角下性能下降的缺陷,仿真结果验证了该算法的有效性。

关键词: 雷达; 非正侧视阵; 杂波抑制; 空时自适应; 多普勒频移

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)04-0977-04

Study on Clutter Suppression Algorithm for Airborne Radar with Non-sidelooking Arrays

Gong Qing-yong Zhu Zhao-da

(College of Information Science and Technology, NUA, Nanjing 210016, China)

Abstract: Since the airborne radar clutter spectrum varies with the range for non-sidelooking arrays, the clutter covariance matrix can not be estimated by the neighboring range cells due to the non-homogenous in range. To resolve the range-dependent clutter non-homogenous problem, especially for the short range cell, an improved Doppler warping algorithm is proposed in this paper, which implemented the space frequency compensation in element-Doppler domain for the Doppler warping compensated data, and results in an improved mainlobe clutter suppression performance. Compared with the original algorithm, the proposed algorithm is also simple and easy to be realized. In addition, it overcomes the performance degradation under big crab angle. Simulation results verify the validity of this method.

Keywords: Radar; Non-sidelooking arrays; Clutter suppression; Space-Time Adaptive Processing (STAP); Doppler Warping (DW)

1 引言

一般情况下关于机载相控阵雷达自适应杂波抑制的研究大多是基于天线阵面位于载机正侧面。但是,在实际应用中天线的架设可能有多种方式,对于非正侧视阵列结构,其空时二维杂波谱结构已明显不同于正侧视阵的情况,杂波结构变得十分复杂。在正侧视情况下,各距离单元的杂波谱在方位-多普勒平面上完全重合,杂波谱不会因为距离单元的变化而展宽,然而对于非正侧视阵列结构,杂波谱在方位-多普勒平面上不再呈斜带而是呈椭圆分布,并且随距离而变化,即在距离维上是非均匀的,尤其是在近程这种非均匀现象更为严重。此时如果直接采用距离采样统计平均来估计杂波协方差矩阵,由此得到的自适应权不可能在待检测单元的杂波处形成应有的窄而深的凹口,原因在于各距离单元的杂波谱在方位-多普勒平面上不重合,导致杂波谱严重展宽。

目前,解决非正侧视阵雷达杂波特别是近程杂波的非均匀问题的主要方法有降秩或降维法、多普勒频移(DW)

法^[1,2]、尺度变换法^[3-6]、导数更新(DBU)法^[7]和参数估计法^[8-10]等。降秩或降维的目的是为了降低训练样本数,只在待检测距离单元临近取少量距离单元作为训练样本来估计协方差矩阵,从而降低杂波的非均匀性,而训练样本数的减少又影响杂波协方差矩阵的估计精度,因此这二者相矛盾。DW法和尺度变换法同属杂波谱搬移法,区别在于:DW法首先根据杂波的空时耦合关系得到各距离单元杂波的多普勒频率,然后将待补偿单元杂波沿多普勒频率方向平移到对应参考单元杂波多普勒位置,属于多普勒一维平移,算法简单,易于实现;但在偏航角较大时,其性能较差。尺度变换法是将待补偿单元的杂波谱搬移到参考单元杂波谱对应的位置,实现复杂。DBU算法虽然简单,但是由于它处理的前提条件是假设权值是距离的一次函数,而且求权所需的训练样本数增加了一倍,因此补偿性能较差。参数估计法一般是通过临近距离门的杂波数据来估计杂波散射系数,从而预测检测单元的杂波协方差矩阵,但其性能受杂波单元数选择的影响较大。

DW 算法简单且易于实现,因此本文对 DW 算法进行改进,提高其在大偏角时的性能。本文第2节建立非正侧视阵杂波模型;第3节分析 DW 算法的性能及其缺陷;第4节介绍了改进 DW 算法的实现原理及步骤;第5节通过仿真实验,验证改进算法的性能;最后给出全文结论。

2 非正侧视阵机载雷达的杂波谱

非正侧视阵机载雷达的结构模型如图1所示。图中P为散射体,直角坐标系(x,y,z)满足右手螺旋法则。假定雷达天线为均匀线阵结构,位于坐标平面(x,y)内,载机以速度 v_p 沿x轴飞行, ψ 为偏航角, β, α 分别为散射体P相对于天线轴向和速度 v_p 方向的夹角, φ, θ 分别为方位角和俯仰角。由图1可以得到散射体P的多普勒频率和空间角频率分别为

$$f_d = \frac{2v_p}{\lambda} \cos \alpha = \frac{2v_p}{\lambda} \cos \varphi \cos \theta \quad (1)$$

$$f_s = \cos \beta = \cos(\varphi - \psi) \cos \theta \quad (2)$$

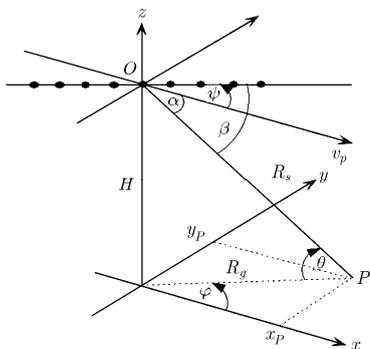


图1 非正侧面阵机载雷达结构模型

令 $\tilde{f}_d = f_d \lambda / (2v_p)$,由式(1),式(2)可得散射体P的空间角频率和多普勒频率的关系为

$$\tilde{f}_d^2 - 2\tilde{f}_d \cos \beta \cos \psi + \cos^2 \beta = \sin^2 \psi \cos^2 \theta \quad (3)$$

由式(3)可知,当载机偏航角 $0^\circ < \psi < 90^\circ$ 时,空时二维杂波谱在 $\tilde{f}_d \sim \cos \beta$ 平面上为一簇斜椭圆,当 $\psi = 90^\circ$ 时,杂波谱为一簇正椭圆。如果忽略后向辐射,则实际的杂波谱只为全椭圆的一半,这时,如果已知空间频率 $f_s = \cos \beta$,则由式(3)可得

$$\tilde{f}_d = \cos \psi \cos \beta + \sqrt{\cos^2 \theta - \cos^2 \beta} \sin \psi \quad (4)$$

同理,如果已知多普勒频率 f_d ,则 \tilde{f}_d 已知,也可以解得空间频率

$$\cos \beta = \tilde{f}_d \cos \psi \mp \sqrt{\cos^2 \theta - \tilde{f}_d^2} \sin \psi \quad (5)$$

图2(a)和2(b)分别给出了偏航角为 30° 和 90° 时,不同斜距对应的空时二维杂波谱,载机飞行高度 $H = 6\text{km}$ 时,图中从里到外对应的斜距分别为 $7\text{km}, 10\text{km}, 15\text{km}$ 和 100km 。由图2中各距离单元杂波谱的分布可见,当 $\psi \neq 0$ 时,杂波谱与距离单元有关,各距离单元的杂波特性各不相同,尤其是在近程距离单元,杂波谱的分布特性随距离的变化而急剧变化,当到了远程距离单元,杂波谱特性的这种变化明显减慢直至

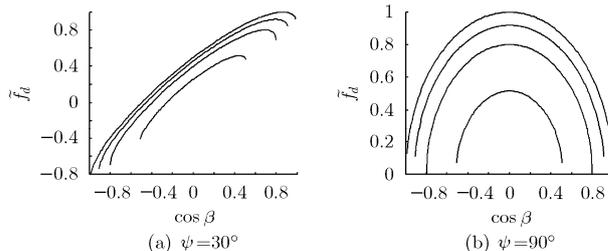


图2 空时二维杂波谱分布

收敛,因此非正侧视相控阵机载雷达的近程杂波抑制需要作距离相关性补偿。

3 多普勒频移法的缺陷

多普勒频移法属杂波谱搬移法,它首先根据杂波的空时耦合关系得到各距离单元杂波的多普勒频率,然后将待补偿单元杂波沿多普勒频率方向平移至对应参考单元杂波多普勒位置,属于多普勒一维平移。其实现原理如图3所示。图中,参考单元 $R_0 = 10.75\text{km}$,待补偿单元 $R = 7\text{km}$,待检测的空间频率 $\cos \beta_0 = 0$,虚线表示待补偿单元平移前空时二维杂波谱分布,实线表示平移后杂波谱分布。

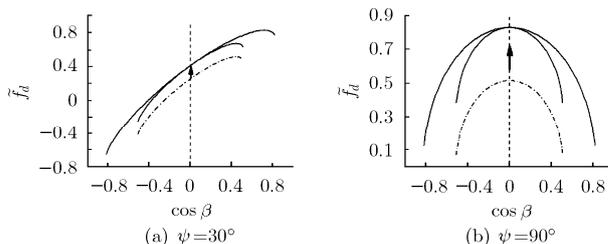


图3 多普勒频移法补偿原理

由图3可知,当偏航角度较小时,补偿后各距离单元的杂波谱重合程度较好,然而当偏航角度较大时,补偿后各距离单元的杂波谱重合程度较差,因此多普勒频移法补偿效果不理想。因此,需对DW补偿后的数据进行进一步处理,提高其在大偏航角时的性能。

4 改进的DW算法

由于DW补偿算法在偏航角度较大时,补偿后各距离单元的杂波谱重合程度较差,因此可对补偿后的数据再进行空间频率补偿。由于影响算法性能的主要是主杂波,因此本改进算法只对主杂波带宽内的多普勒进行逐段空间频率补偿。其实现原理如图4所示。

如图4(a)所示,对于前向阵,当 $\cos \beta_0 = 0$ 时,必须向左向右两个方向同时平移 $\Delta_1 \cos \beta_k$,而当 $\cos \beta_0 \neq 0$ 时,只需向左或向右平移 $\Delta_1 \cos \beta_k$ 即可,如图4(b)所示。对于 $\psi \neq 90^\circ$ 的斜椭圆情况,平移方法与后者类似,只需向左或向右平移 $\Delta_1 \cos \beta_k$ 即可。下面分别对这两种情况下的算法实现步骤进行说明。

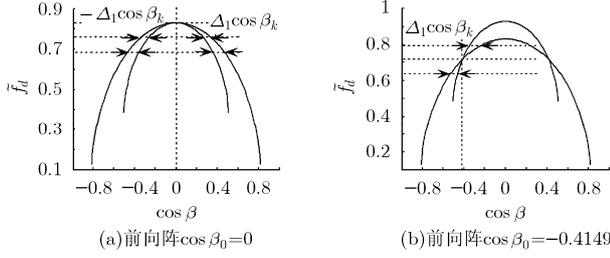


图4 改进DW算法原理示意图

(1)确定补偿量 将经过多普勒补偿后的数据转换到阵元-多普勒域。设第 k 个多普勒通道多普勒频率为 f_k ，输出的阵列数据矢量为 \mathbf{Y}_k ，根据公式(5)分别计算参考单元和训练单元对应的空间频率 $\cos \beta_{k0}$ 和 $\cos \beta_k$ ，确定空间频率补偿量 $\Delta_1 \cos \beta_k = \cos \beta_{k0} - \cos \beta_k$ 。

(2)确定补偿权矢量 如果是图4(a)的情况，则需对 \mathbf{Y}_k 作傅里叶变换将其变换到空间波束域得到 \mathbf{Z}_k ，求出 \mathbf{Z}_k 的正频和负频部分 \mathbf{Z}_{k1} 和 \mathbf{Z}_{k2} ，再对 \mathbf{Z}_{k1} 和 \mathbf{Z}_{k2} 分别作逆傅里叶变换将其变换回空间阵元域得到 \mathbf{Y}_{k1} 和 \mathbf{Y}_{k2} ，由补偿量 $\Delta_1 \cos \beta_k$ 分别构造对正频数据 \mathbf{Y}_{k1} 和负频数据 \mathbf{Y}_{k2} 的补偿权矢量 \mathbf{W}_{k1} 和 \mathbf{W}_{k2} ，其中

$$\mathbf{W}_{k1} = [1, \dots, e^{j2\pi\Delta_1 \cos \beta_k}, \dots, e^{j2\pi(N-1)\Delta_1 \cos \beta_k}]^T$$

$$\mathbf{W}_{k2} = [1, \dots, e^{-j2\pi\Delta_1 \cos \beta_k}, \dots, e^{-j2\pi(N-1)\Delta_1 \cos \beta_k}]^T$$

由 \mathbf{W}_{k1} 和 \mathbf{W}_{k2} 分别对 \mathbf{Y}_{k1} 和 \mathbf{Y}_{k2} 作补偿得到 \mathbf{Y}'_{k1} 和 \mathbf{Y}'_{k2} ，其中 $\mathbf{Y}'_{k1} = \mathbf{Y}_{k1} \circ \mathbf{W}_{k1}$ ， $\mathbf{Y}'_{k2} = \mathbf{Y}_{k2} \circ \mathbf{W}_{k2}$ ，符号 \circ 表示矢量对应元素相乘；由 \mathbf{Y}'_{k1} 和 \mathbf{Y}'_{k2} 得到最终补偿结果 \mathbf{Y}'_k ，即 $\mathbf{Y}'_k = \mathbf{Y}'_{k1} + \mathbf{Y}'_{k2}$ 。

如果是图4(b)的情况，算法则简单得多。由补偿量 $\Delta_1 \cos \beta_k$ 确定补偿权矢量 $\mathbf{W}_k = [1, e^{j2\pi\Delta_1 \cos \beta_k}, \dots, e^{j2\pi(N-1)\Delta_1 \cos \beta_k}]^T$ ，直接与 \mathbf{Y}_k 进行点乘即完成了对空域频率的补偿，即 $\mathbf{Y}'_k = \mathbf{Y}_k \circ \mathbf{W}_k$ 。

5 仿真结果及分析

雷达系统仿真参数如下：雷达工作波长 $\lambda = 0.23\text{m}$ ，载机高度 $H = 6\text{km}$ ，阵元数 $N = 8$ ，脉冲数 $K = 16$ ，冲重复频率 $\text{PRF} = 2.2609\text{kHz}$ ，输入杂噪比为 $\text{CNR} = 60\text{dB}$ ，载机速度 $v_p = 130\text{m/s}$ ，距离门宽度为 $0.5\mu\text{s}$ 。本实验从 7000m 时开始接收数据，检测单元位于第 51 个距离单元，即 $R_0 = 10.75\text{km}$ ，在检测单元左右各取 50 各训练单元(即 $7000 - 14500\text{m}$ 区间)。图5给出了波束指向方位角 -60° ，偏航角分别为 30° 和 60° 时的改善因子仿真结果。图6给出了前向阵不同波束指向时的改善因子。图中MDW表示改进后的算法。

图6(a)波束指向为阵面法线方向，图6(b)波束指向为偏离阵面法线方向 -30° 。从图5和图6可以看出，改进算法在主杂波区性能显著提高，主杂波区明显变窄，对不同的波束指向和不同偏航角其改善性能同样明显，因此有效地克服了原DW算法在大偏航角下性能差的缺陷。

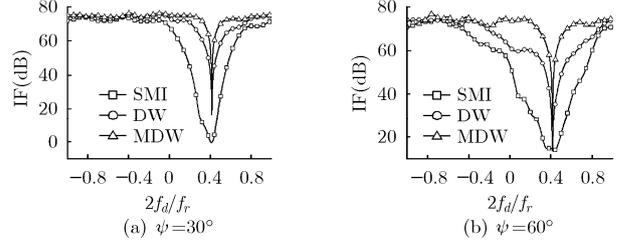


图5 不同偏航角时的改善因子

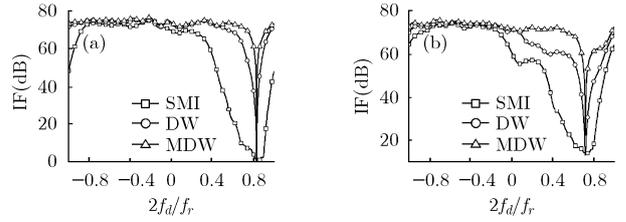


图6 前向阵不同波束指向时的改善因子

6 结束语

非正侧视阵的主杂波谱宽度比正侧视阵的主杂波谱宽度要宽得多，杂波自由度也要大得多，因此，非正侧视阵条件下的杂波抑制要比正侧视阵条件下的杂波抑制困难。多普勒频移补偿能有效改善近程杂波距离上的非平稳性，其算法简单，易于实现，但当偏航角较大时性能下降，因此，本文对DW算法进行了改进，将经过DW补偿后的数据转换到阵元-多普勒域，进一步对空域频率进行补偿。改进算法明显的改善了主杂波区的杂波抑制性能，仿真结果验证了算法的有效性。

参考文献

- [1] Borsari G K. Mitigating effects on STAP processing caused by an inclined array. IEEE Proceedings of National Radar Conference. Dallas, USA, IEEE, 1998: 135-140.
- [2] Kreyenkamp O and Klemm R. Doppler compensation in forward-looking STAP radar. IEE Proc.-Radar, Sonar, Navig., 2001, 148(5): 253-258.
- [3] Lapierre F, Verly J G, and Droogenbroeck M V. New methods for handling the range dependence of the clutter spectrum in non-sidelooking monostatic STAP radars. IEEE Proceedings of ICASSP, Hongkong, China, 2003: 73-76.
- [4] Lapierre F, Verly J G, and Droogenbroeck M V. New solutions to the problem of range dependence in bistatic STAP radars. IEEE National Radar Conference, Huntsville, AL, 5-8 May 2003: 452-459.
- [5] Lapierre F and Verly J G. Registration-based range-dependence compensation for bistatic STAP radars. EURASIP Journal on Applied Signal Processing 2005, (1): 85-98.
- [6] Lapierre F and Verly J G. Computationally-efficient range-

- dependence compensation method for bistatic radar STAP. 2005 Int. Radar Conference, Arlington, VA, May 2005: 714-719.
- [7] Zatman M. Circular array STAP. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(2): 510-517.
- [8] Jaffer A, Himed B, and Ho P T. Estimation of range-dependent clutter covariance by configuration parameter estimation. Proc. of the IEEE Int. Radar Conf., Arlington, VA, USA, May 2005: 596-601.
- [9] Jaffer A, Ho P T, and Himed B. Adaptive compensation for conformal array STAP by configuration parameter estimation. Proc. of the IEEE National Radar Conf., Verona, NY, USA, April 2006: 731-736.
- [10] Nert X, Acheroy M, and Verly J G. Maximum likelihood range dependence compensation for STAP[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Honolulu, Hawaii, USA, April 15-20, 2007, Vol. 2: II-913-II-916.
- 龚清勇: 女, 1979年生, 博士, 研究方向为动目标检测和雷达信号处理.
- 朱兆达: 男, 1939年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达信号检测与处理.