

机载雷达斜视阵下杂波抑制的方法

姜 晖¹, 曲婧华²

(1. 西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西西安, 710121; 2. 航天局 802 所军代室, 上海, 200090)

摘要 在机载斜视阵中杂波多普勒频率随距离发生变化, 导致传统的空时自适应处理方法不能有效抑制杂波, 因此, 提出一种谱补偿方法。该方法利用训练单元与待检单元的空域导向矢量关系得到相似度量值, 用此度量值再对训练单元的数据进行加权预处理, 提高了数据的平稳性; 为降低回波中孤立干扰或强目标对采样协方差矩阵估计的影响, 对预处理后的数据使用非均匀检测器进行干扰剔除, 从而提高机载雷达的检测性能 1~3 dB。使用传统的空时自适应处理方法对剔除干扰后的数据进行杂波抑制, 通过对数据的处理, 证明了该方法的可行性和有效性。

关键词 相似度量; 孤立干扰; 非均匀检测器

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.06.007

中图分类号 TN959.73 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)06-0027-03

A Study of Clutter Suppression in the Squint Airborne Radars

JIANG Hui¹, QU Jing-hua²

(1. School of Communications and Information Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunication, Xi'an 710121, China; 2. Military Representative Office by Air Force in the No. 802 Institute of SAST, Shanghai 200090, China)

Abstract: In the squint airborne radars, the range dependence of clutter spectrum degrades the performance of conventional space time adaptive processing for clutter suppression, so a new method is proposed. In this method the similarity measure value is obtained by using the spatial domain steering vector relationship between the range bin under test and under test range bins. The received data of adjacent range bins is weighted by these values. In order to improve the detection performance of airborne radar, the non-homogeneity detector (NHD) is used to mitigate these interferences, and then the conventional STAP is applied to the clutter suppression. Finally, simulation results show that the new method is effective and practical.

Key words: similar measure; isolated interference; non-homogeneity detector

由于机载雷达被架设在飞机上, 因此具有极强的机动性和良好的侦查性能, 但是雷达在这种工作情况下更多处于斜视状况, 这将导致杂波谱在 $(f_d, \cos(\psi))$ 的平面上呈现出非线性, 这就不能利用常规空时自适应处理方法对杂波进行有效抑制。为提高杂波抑制的性能, 人们提出多种解决方案^[1-5],

但是已有的方法很少考虑回波中相邻距离门间的相关性。针对该问题, 本文采取相似性度量^[6-8]的方法对训练单元数据进行预处理, 考虑到被探测的地面上还会存在强反射目标或孤立目标^[9-10], 这些也影响了协方差矩阵的估计, 故利用广义内积^[5]对数据进行干扰剔除, 使训练单元的数据统计特性接近待

收稿日期: 2012-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271292, 61301258); 西邮中青年基金资助项目(1090436, 1090425)

作者简介: 姜 晖(1976—), 男, 陕西西安人, 讲师, 博士, 主要从事阵列信号处理研究。

E-mail: jh02_76@126.com

检单元,降低数据的非平稳性,提高雷达检测性能。

1 数据模型

假定天线个数为 N ,每次接收的数据由 K 个脉冲组成,故将接收的数据记为 x_{nk} ($1 \leq n \leq N, 1 \leq k \leq K$)。现定义 H_0 、 H_1 代表无目标、有目标的 2 种状态,在此定义下接收数据可写为:

$$x_{nk} = \begin{cases} c+n, & \text{假设为 } H_0 \\ bS+c+n, & \text{假设为 } H_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: b 为回波幅度值; c 为杂波; n 为系统中热噪声; S 为空时导向矢量,其值为:

$$S = S_s \otimes S_t \quad (2)$$

式中: \otimes 为 kronecker 积; S_t 为时域导向矢量; S_s 为空域导向矢量。

根据最优化规则,可得线性约束公式:

$$\begin{cases} \min_W & W^H R_x W \\ \text{s. t.} & W^H S = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中 R_x 为接收数据的协方差矩阵。

由此可求解出最优权:

$$W_{opt} = \frac{R_x^{-1} S}{S^H R_x^{-1} S} \quad (4)$$

其对应的改善因子为:

$$IF = \frac{SCNR_{out}}{SCNR_{in}} = S^H R_x^{-1} S (CNR_{in} + 1) \sigma_n^2 \quad (5)$$

式中: σ_n^2 为噪声功率; CNR_{in} 为杂噪比。

2 基于空域导向矢量拟合的 STAP 方法

假设飞机飞行保持水平方向,飞行速度为 v ,雷达工作波长为 λ ,天线法线与速度方向的夹角为 θ_p 。散射体相对于天线轴向的方位角和高低角分别是 θ_a 和 φ ,其相应结构见图 1(a),由此可得到散射体回波多普勒频率为:

$$f_{dk} = \frac{2V}{\lambda} \cos(\theta_a + \theta_p) \cos(\varphi) \quad (6)$$

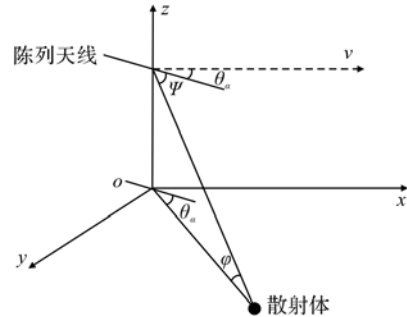
对式(6)进行变换可得:

$$\left[\frac{f_r}{2f_{dm}} \right]^2 \left[\frac{2f_{dk}}{f_r} \right]^2 + \cos^2 \psi - \cos \theta_p \frac{f_r}{f_{dm}} \frac{2f_{dk}}{f_r} \cos \psi = \cos^2 \varphi \sin^2 \theta_p \quad (7)$$

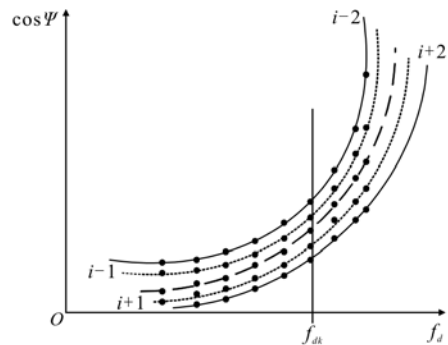
式中: $f_{dm} = 2V/\lambda$; f_r 是脉冲重复频率; ψ 是散射体相对于天线轴的锥角。

因为数据中飞机阵面与速度矢量方向的夹角比

较小,通常对其按照正侧面阵的情况处理。但实际情况下的偏航角还是会对回波产生影响的^[11],因此,在进行杂波抑制时有必要先对杂波谱进行有效的补偿。



(a) 阵面与杂波的几何关系图



(b) 杂波谱线结构图

图 1 斜视阵中几何关系与杂波谱线示意图

Fig. 1 The geometric relation of squint airborne radar and schematic diagram of clutter spectrum

根据斜视阵情况的杂波谱线可得图 1(b)的相邻距离门杂波谱线,假定第 i 个距离环为待检单元,现有 Q 个训练单元,通过投影处理使得训练单元与待检单元的数据统计特性近似一致,实现不同距离单元的杂波谱补偿^[7]。

现对待检单元的谱线进行均匀采样,由此可得到 M 个点的空域导向矢量:

$$S_{s_i} = [1 \quad e^{j2\pi d \cos(\varphi_i, m)/\lambda} \quad \dots \quad e^{j2\pi d(N-1) \cos(\varphi_i, m)/\lambda}]^T \quad (8)$$

式中: φ_i 、 θ_m 分别为俯仰角和方位角; $\cos(\varphi_i, m) = \cos(\varphi_i) \cos(\theta_m)$; $f_{dk_m} = 2v \cos(\varphi_i, m)/\lambda$ 。

同理,可得到第 q ($q \neq i$) 个训练单元的空域导向矢量,再利用同一个多普勒通道上训练单元和待检单元上的空域导向矢量关系,可得投影矩阵 $T(q)$ 的线性约束公式:

$$\begin{cases} \min_{T(q)} & \| S_{s_i} - T(q) S_{s_q} \|_F \\ \text{s. t.} & T(q)^H T(q) = 1 \end{cases} \quad (9)$$

通过求解式(9),可得:

$$T(q) = S_{s_i} (S_{s_q})^+ \quad (10)$$

式中: $(\cdot)^+$ 为 Moore-Penrose 逆; S_{s_i} 、 S_{s_q} 分别为第 i, q

个空域导向矢量。

利用投影公式对数据进行预处理, 得到:

$$y(q) = \mathbf{T}(q) \mathbf{X}(q) \quad (11)$$

虽然通过无损变换^[12]可获得一个较好的结果, 但在实际的回波数据中可能会存在孤立干扰或强反射目标, 这些都对方差矩阵的估计产生不利影响, 因此, 将利用广义内积法^[5]对强干扰或孤立目标进行剔除, 获得新数据样本, 最终提高杂波抑制的能力, 故可得到:

$$\mathbf{Y}(q) = y(q) \mathbf{R}_{y(q)}^{-1} y(q)^H \quad (12)$$

式中, $\mathbf{R}_{y(q)}$ 为前 q 个距离门的采样协方差矩阵, $\mathbf{R}_{y(q)} = (1 - \alpha) \mathbf{R}_{y(q-1)} + \alpha y(q) y(q)^H$, α 为应用于当前数据样本的加权系数, $0 < \alpha < 1$ 。

构成第 k 个多普勒门上的杂波协方差矩阵为:

$$\mathbf{R}_k = \frac{1}{Q} \sum_q \mathbf{Y}(q) \mathbf{Y}(q)^H \quad (13)$$

根据线性约束规则, 可得最优权:

$$\mathbf{W}_k = \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{S}_s / (\mathbf{S}_s^H \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{S}_s) \quad (14)$$

首先通过对训练单元进行投影预处理, 接着进行干扰或强目标的剔除工作, 使其统计特性接近待检距离门的数据, 提高了杂波协方差矩阵估计的准确性, 可以有效的抑制杂波。

3 仿真分析

本文处理的数据参数如下: 飞机飞行高度 $h = 3\ 073$ m, 机速 $v = 100$ m/s, 频率 $f = 1.24$ GHz, 重复频率 $f_r = 1\ 984$ Hz, 相干处理脉冲数 $CPI = 128$, 距离门宽 $B = 120.675$ m, 载机偏航角 7.28° 。

使用 3DT^[13] 对处理后的数据进行改善因子比较, 结果见图 2~图 3。从图中可见, 进行预处理后的数据再进行杂波抑制的整体性能优于未处理数据 1~3 dB。

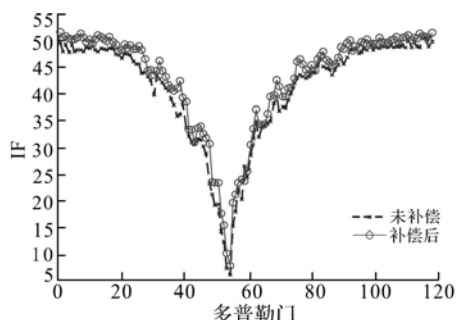


图 2 弱杂波处的性能改善因子

Fig. 2 Statistic IF on weak clutter region

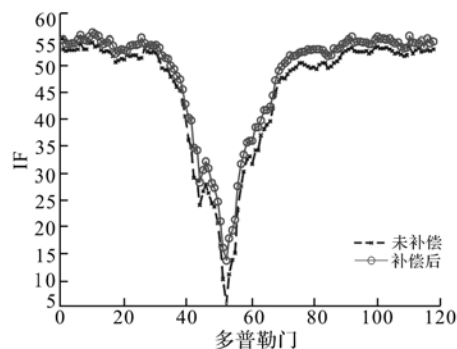


图 3 强杂波处的性能改善因子

Fig. 3 Statistic IF on strong clutter region

4 结语

本文先对接收数据进行预处理, 同时针对可能存在的孤立干扰或强目标, 再用广义内积法剔除这些数据信息, 降低对方差矩阵估计的影响, 使训练单元与待检单元间统计特性近似一致, 最终可较好的抑制杂波。最后, 将本文提出的方法应用到数据处理中, 验证了方法的有效性。

参考文献 (References):

- [1] 龚清勇, 朱兆达. 非正侧视阵机载雷达杂波抑制算法研究[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 977-980.
GONG Qingyong, ZHU Zhaoda. Study on clutter suppression algorithm for airborne radar with non-sidelooking arrays[J]. Journal of electronics and information technology, 2009, 31(4): 977-980. (in Chinese)
- [2] Gong Qing yong, Zhu Zhao da. Study on STAP algorithm for radar target detection in heterogeneous environments [C]//2008 Congress on image and signal processing. Tianjin: IEEE press, 2008: 531-535.
- [3] Xie Wenchong, Chen Jianwen, Wang Yongliang. Study on STAP in non-homogeneous clutter environment [C]//2008 Congress on image and signal processing. Tianjin: IEEE press, 2008: 1-6.
- [4] Xie Wenchong, Wang Yongliang, Hu Wenlin. Study on clutter suppression approach for airborne radar with non-sidelooking array [C]//Radar 2006. Shanghai: IEEE press, 2006: 1-4.
- [5] Michael A Tinston, William C Ogle, Michael L, et al. Classification of training data with reduced-rank generalized inner product [C]//Radar 2004. Philadelphia: IEEE press, 2004: 236-241.

(下转第 37 页)

- XING Qinghua, LIU Fuxian. Modeling on area air defense optimization deployment system[J]. System engineering and electronics, 2006, 28(5): 712-715. (in Chinese)
- [3] 邢清华. 防空作战智能辅助决策研究[D]. 西安:空军工程大学, 2003.
XING Qinghua. Study on intelligent decision support of air defense operation[D]. Xi'an: Air force engineering university, 2003. (in Chinese)
- [4] 刘健. 地空导弹兵作战部署定量分析方法研究[D]. 西安:空军工程大学, 2002.
LIU Jian. Study on quantitative analysis method of disposition for ground-to-air defense operation[D]. Xi'an: Air force engineering university, 2002. (in Chinese)
- [5] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2006.
YUE Chaoyuan. Theory and method of decision-making[M]. Beijing: Science press, 2006. (in Chinese)
- (编辑:田新华)
-
- (上接第29页)
- [6] 曹建蜀,汪学刚. 机载前向阵雷达近程杂波频移补偿[J]. 电子科技大学学报, 2006, 35(3):320-323.
CAO Jianshu, WANG Xuegang. Doppler compensation in airborne forward-looking radar for ground short range clutter[J]. Journal of university of electronic science and technology of China, 2006, 35(3):320-323. (in Chinese)
- [7] 姜晖,廖桂生. 基于相似性度量的非正侧阵杂波谱补偿方法[J]. 电波科学学报, 2009, 24(6):1078-1080.
JIANG Hui, LIAO Guisheng. An approach for clutter spectrum compensation based on similar measure[J]. Chinese journal of radio science, 2009, 24(6): 1078-1080. (in Chinese)
- [8] Jiang Hui, Liao Guisheng, Qu Yi. Compensation of clutter spectrum for forward-looking radar based on the spatial steering vector fitting[C]//IET'09 (NO. 0344). Guilin:IEEE press, 2009:1-4.
- [9] 王万林,廖桂生,张光斌. 相控阵 AEW 雷达杂波抑制的非均匀处理方法研究[J]. 电波科学学报, 2004, 19(3): 348-353.
WANG Wanlin, LIAO Guisheng, ZHANG Guangbin. Study on STAP in non-homogeneous environment for phased array airborne early warning radar[J]. Chinese journal of radio science, 2004, 19(3): 348-353. (in Chinese)
- [10] 宁蔚,廖桂生. 机载双通道雷达空时自适应处理中的样本去污[J]. 电波科学学报, 2007, 22(3):470-475.
NING Wei, LIAO Guisheng. Elimination of pollutions in training samples for airborne dual-channel radars space-time adaptive processing[J]. Chinese journal of radio science, 2007, 22(3):470-475. (in Chinese)
- [11] Yang Z. A STAP approach to estimate drift angle and aircraft velocity[C]//Radar 2006. Shanghai: IEEE press, 2006:24-27.
- [12] 姜晖,卢光跃. 贝塞尔级数展开的机载前视阵雷达杂波谱补偿方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(3):185-189.
JIANG Hui, LU Guangyue. Compensation of clutter spectrum for airborne forward-looking radar based on the Bessel series expansion[J]. Journal of Xidian University, 2012, 39(3):185-189. (in Chinese)
- [13] 廖桂生,保铮. 机载雷达时空二维部分联合自适应处理[J]. 电子科学学刊, 1993, 15(6): 575-580.
LIAO Guisheng, BAO Zheng. A partial adaptive spatial-temporal processor for air-borne radars[J]. Journal of electronics, 1993, 15(6):575-580. (in Chinese)
- (编辑:田新华)