

基于联合时间维训练样本的非平稳杂波抑制方法

赵耀东^{1,2}, 吕晓德¹, 向茂生¹

(1. 中国科学院 电子学研究所 微波成像技术国家级重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对机载雷达的杂波距离依赖性导致空时自适应处理(STAP)器性能下降的问题, 提出一种基于回波快-慢时间二维训练样本的非平稳杂波抑制方法。利用脉冲雷达回波信号的时域平稳性以及杂波多普勒频率随距离缓变的特点, 在 STAP 时域分段的降维处理中, 利用慢时间和快时间维的数据样本联合估计协方差矩阵, 达到减小距离向杂波非平稳的目的; 对所有滤波器输出进行相干叠加, 减小降维引起的孔径损失, 提高输出信杂噪比。将该方法应用于非正侧视阵机载雷达杂波抑制中, 仿真结果表明不仅能显著提高协方差矩阵的估计精度和主瓣杂波抑制性能, 而且具有较高的稳健性。

关键词: 雷达工程; 杂波抑制; 距离依赖性; 时间维; 样本选取

中图分类号: TN959.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2013)09-1084-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.09.005

Nonstationary Clutter Suppression Based on Joint-time Secondary Data Selection

ZHAO Yao-dong^{1,2}, LYU Xiao-de¹, XIANG Mao-sheng¹

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The range dependence is one of the intrinsic features for the clutter of airborne radar, which degrades the performance of conventional space-time adaptive processor (STAP). A novel algorithm of nonstationary clutter suppression, which is based on the joint-time secondary data selection, is presented. Due to the stationarity of radar echo in time domain and the slow change in the Doppler frequency with range, both the slow and quick time secondary data are used as the training samples for sub-CPI adaptive processing to mitigate the range dependence, and ultimately the loss of time aperture is decreased by summing the outputs of all the sub-processors coherently. The simulation results indicate that the algorithm can improve the precision of covariance matrix and the performance of main-lobe clutter suppression, and has a higher robustness.

Key words: radar engineering; clutter suppression; range dependence; time domain; secondary data selection

收稿日期: 2012-03-20

基金资助: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(1184-03)

作者简介: 赵耀东(1986—),男,博士研究生。E-mail: zhyd0921@163.com;

吕晓德(1969—),男,研究员。E-mail: louee@mail.ie.ac.cn

0 引言

空时自适应处理(STAP)^[1-2]通过对训练样本数据的统计学习,估计得到待检测单元(CUT)的协方差矩阵,利用二维自适应滤波技术能够有效抑制杂波。在机载雷达天线正侧视的情形下,不同距离单元具有相同的空时杂波分布特性,传统 STAP 方法采用距离向回波数据作为训练样本,可以获得理想的杂波抑制性能。然而,实际应用中多数体制和天线配置形式的机载雷达都具有较强的杂波距离依赖性,如常见的非正侧视阵雷达^[3-4]和双基地雷达^[5]等。这种由雷达系统特征引起的杂波谱分布随距离变化的现象,即使在地面场景十分均匀的环境下,也会导致所得协方差矩阵存在较大误差,进而展宽 STAP 杂波抑制凹口,降低算法对慢速运动目标的检测性能^[1,3-11]。

目前,减小距离依赖性导致杂波非平稳的 STAP 方法主要分为3大类:1)杂波补偿与数据变换类,包括多普勒频移法(DW)^[6]、角度-多普勒补偿法(ADC)^[7]、尺度变换法^[8]及相应的改进算法^[3]等,它们根据系统已知参数或杂波空时耦合关系,通过对距离向回波数据(或其变换域)进行预处理,补偿训练样本与 CUT 的杂波多普勒差异。2)线性预测与参数估计类,包括参数自适应匹配滤波法(PAMF)^[9]、最大似然(ML)估计法^[10]和基于导数更新(DBU)的方法^[11]等,它们通过相邻距离单元的回波数据或所得权矢量来估计整个场景的杂波散射系数或传输模型参数,进而预测 CUT 的协方差矩阵或滤波器权矢量。3)减小训练样本数目,典型的如降维 STAP 技术通过减小系统自由度,来减少协方差矩阵估计时对训练样本总数的要求^[2]。前2类方法虽然在不同的应用场景下能够有效改善杂波距离依赖性,但通常实现复杂且运算量较大;第3类方法虽然简单,但又会存在较大的性能损失。

本质上,STAP 方法是一种基于杂波统计特性的自适应匹配滤波算法,杂波抑制的性能很大程度上取决于训练样本的选取策略和协方差矩阵的估计方法^[12-13]。传统 STAP 方法均是完全利用距离向数据样本来估计杂波的协方差矩阵,而如果在 STAP 实现过程中,既减少距离向训练样本,也选用其他维的数据参与估计,便可以降低距离依赖性对协方差矩阵所产生的不利影响,同时也不会因为降维而使系统性能恶化。文献[14]提出了一种基于雷达回波脉冲维数据的自适应处理方法,在严重非均匀杂

波环境下取得了较好的杂波抑制性能,但由于仅选用了待检测距离单元内的数据,实际中增加的样本数量有限,并且还可能出现目标相消的情况。本文以此为基础,根据对机载雷达脉冲回波信号时域平稳性的分析,在杂波协方差矩阵估计时同时采用快-慢时间维数据作为训练样本,提出了一种时域降维结构下的自适应非平稳杂波抑制方法。在地面场景比较均匀的情况下,能够显著改善机载雷达杂波的距离依赖性。并经过仿真验证,当系统存在阵列误差和杂波内部运动(ICM)时,该方法仍然能够有效抑制杂波,具有较高的稳健性。

1 雷达信号时域平稳性分析

在机载雷达系统模型中,1个相干处理间隔(CPI)内天线以恒定的脉冲重复频率(PRF) f_r 发射 M 个脉冲,采样后分别获得 L 个距离单元回波信号,如图1所示。

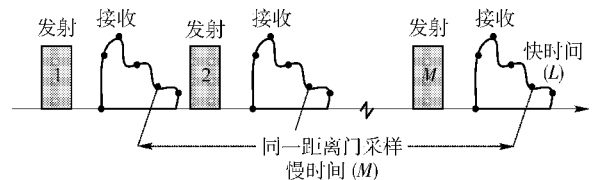


图1 机载雷达回波的时间采样示意图

Fig. 1 Sampling of echo of airborne radar

其中,距离向的采样间隔设为 τ_s ,一般远小于相邻脉冲的时间间隔 t_r ($t_r = 1/f_r$),因此称距离采样为快时间维,脉冲采样为慢时间维。 τ 和 t 分别为快、慢时间, $x_{i,j}$ 为天线在 $t_i = (i-1)t_r$ ($i = 1, 2, \dots, M$) 时刻发射的脉冲经回波延时 $\tau_j = (j-1)\tau_s$ ($j = 1, 2, \dots, L$) 的接收数据,并按照不同的距离单元和脉冲时间,将数据重排可以得到二维时域(快-慢时间维)采样数据:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,L} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M,1} & x_{M,2} & \cdots & x_{M,L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 & \mathbf{Y}_2 & \cdots & \mathbf{Y}_j & \cdots & \mathbf{Y}_L \\ \mathbf{Y}_{11} & \mathbf{Y}_{12} & \cdots & \mathbf{Y}_{1L} \\ \mathbf{Y}_{21} & \mathbf{Y}_{22} & \cdots & \mathbf{Y}_{2L} \\ \vdots & \vdots & \mathbf{Y}_{kj} & \vdots \\ \mathbf{Y}_{K1} & \mathbf{Y}_{K2} & \cdots & \mathbf{Y}_{KL} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Y}_j = [x_{1,j} \ x_{2,j} \ \cdots \ x_{i,j} \ \cdots \ x_{M,j}]^T$ 为快时间维第 j 个距离单元的数据向量; \mathbf{Y}_{kj} ($k = 1, 2, \dots, K$,

且 $K \leq M$ 为对 \mathbf{Y}_j 进行分块后所得到的第 k 个慢时间维数据向量。

由图 1 可知,雷达在 1 次脉冲发射-接收的过程中,短时间内若天线指向不变,1 个发射脉冲对应的不同距离单元的地杂波回波等于各自照射区域内所有散射体回波的总和。在消除了距离向不同单元的回波功率起伏以后,可以认为发射脉冲重复间隔内沿快时间维方向的回波信号是平稳的,自相关函数为

$$r_{xx}(\tau, \Delta\tau) = r_{xx}(\Delta\tau), \quad (2)$$

即

$$E[x_{i,j}x_{i,j+\Delta j}^*] = E[x_{i,j+q}x_{i,j+q+\Delta j}^*], \quad (3)$$

式中: $\Delta\tau = \tau_s \cdot \Delta j$; Δj 和 q 为任意整数;符号 * 为复数共轭。

根据循环平稳信号分析理论^[15],雷达、声纳、通信等系统中的一些人工信号是一类特殊的非平稳的随机过程,在周期性的采样中其统计量往往具有循环平稳的特点。在慢时间维,虽然重复脉冲采样相对于快时间采样要慢,但由于脉冲重复频率 f_r 一般较大,运动目标的状态在 1 个 CPI 内几乎不发生变化。因此如果不考虑杂波的内部运动,经过 1 个周期之后,下一个脉冲在某距离单元的地杂波回波与上一个脉冲该距离单元相对应,等于相同照射区域内所有散射体的子回波总和,即雷达回波在慢时间维的不同发射脉冲之间表现出以 f_r 为循环频率的循环平稳性。可以进一步推断,即使场景中软散射体不可避免,系统存在较小的 ICM 时,仍然可以认为慢时间维数据近似的平稳,具有相同的信号统计特征。由循环平稳信号的定义可得

$$r_{xx}(t + \tau, \Delta\tau) = r_{xx}(t + m/f_r, \Delta\tau), \quad (4)$$

即

$$E[x_{i,j}x_{i,j+\Delta j}^*] = E[x_{i+m,j+q}x_{i+m,j+q+\Delta j}^*], \quad (5)$$

式中 m 为任意整数。

因此,根据雷达时域采样信号所具有的平稳性及循环平稳性特点,再由协方差矩阵与自相关函数之间的对应关系可知,信号处理中用于表征回波数据时域统计特征的协方差矩阵既可以由距离向快时间维数据向量计算得到,也可以由慢时间维数据向量或快-慢时间维数据联合估计得到,它们在数值上近似相等。

2 联合时间维非平稳杂波抑制方法

2.1 联合时间维的样本选取

由于雷达照射的地面场景和所面临的干扰在实

际中是未知的,STAP 算法中的杂波(包括地杂波、干扰和噪声等)协方差矩阵必须从 CPI 内有限的样本中估计得到。一般主要考虑 2 个问题,即需要多少样本可以获得对协方差矩阵的较佳估计以及如何选取与 CUT 统计特性相同的数据样本。根据 RMB 准则^[2],要使协方差矩阵的估计损失小于 3 dB,则所需的训练数据样本至少为 2~3 倍的系统自由度。第 1 个问题得到解决。而为了在不同的应用场景中能够获得对杂波和干扰的最佳估计,以下主要就第 2 个问题即 STAP 训练样本的选取策略进行讨论。

通常情况下,STAP 杂波抑制在 1 个 CPI 内沿着距离向进行,协方差矩阵估计时的样本选取方法如图 2 所示。最中间的 CUT 包含杂波及可能存在的运动目标回波信号,其相邻两侧黑色的为保护单元,这是因为当前雷达大多发射线性调频(LFM)信号,距离向加窗后的脉冲压缩会使得目标向相邻单元扩展,通过设置保护单元以确保运动目标不会当成干扰信号被抑制掉。

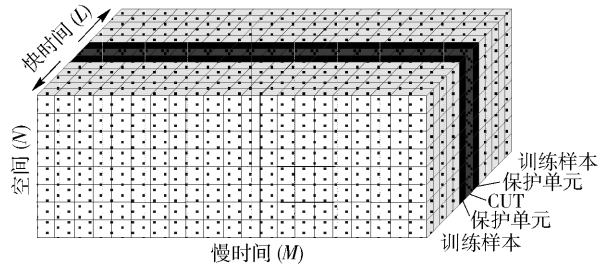


图 2 常规 STAP 训练样本选取方法

Fig. 2 Secondary data selection for conventional STAP

由 ML 估计法,得到的杂波协方差矩阵为

$$\hat{\mathbf{R}}_c = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \boldsymbol{\chi} \boldsymbol{\chi}_j^H, \boldsymbol{\chi}_j = \mathbf{Y}_j \otimes \mathbf{Z}_j, \quad (6)$$

式中: $\mathbf{Z}_j = [z_{j1} \ z_{j2} \ \cdots \ z_{jn} \ \cdots \ z_{jN}]^T$ 为阵列天线 N 个通道的接收数据; $L = 2NM$ 为所需训练样本个数; H 和 \otimes 分别为矩阵共轭转置和 kronecker 乘积; $\boldsymbol{\chi}_j$ 为距离向第 j 个单元的空时快拍。事实上,这种基于距离向邻近样本估计得到待检测距离单元杂波分布特性的方法能够奏效,正是利用了(3)式所表征的雷达快时间维回波数据的平稳特性。

机载预警雷达为了实现全方位搜索和具备更好的运动目标检测性能,工程应用中越来越多地采用了非正侧视阵天线或双基地观测模式。在这些情形下阵列雷达杂波具有距离依赖性,回波数据的快时间维表现出非平稳性。当继续采用这种常规的快时

间维样本选取方法时,所需距离单元数量较多,会导致估计得到的协方差矩阵误差增大,空时杂波谱展宽,STAP 输出信杂噪比 (SIRN) 下降^[1,3-11]。而根据第 2 节分析可知,慢时间维回波数据的循环平稳性是由雷达信号本身特点及周期性脉冲发射-接收模式所决定的,并不会受到杂波距离依赖性的影响,且实际中机载预警雷达为了增加系统的相干积累时间,慢时间维的脉冲数常常可能达到数百^[16],因此,一方面可以采用 STAP 时域降维方法,减少杂波协方差矩阵估计时对训练样本数量的需求,另一方面有效联合慢时间维数据向量,增加协方差矩阵估计时可用的训练样本个数,最终以改变训练样本选取策略的方式达到改善杂波距离依赖性的目的。

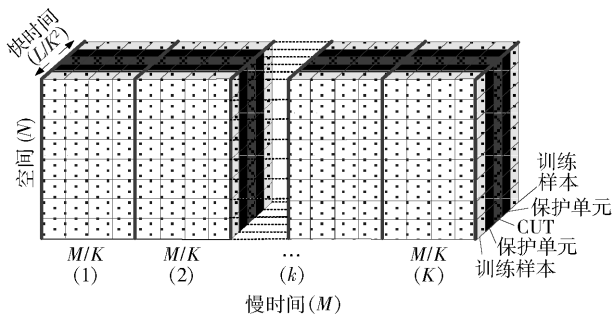


图 3 联合时间维训练样本选取方法

Fig. 3 Method of joint-time secondary data selection

本文称该方法为联合时间维的训练样本选取方法,如图 3 所示。首先将 1 个 CPI 内的慢时间维数据均匀划分成 K (正整数,且 $K \leq M$) 个子 CPI。根据 RMB 准则,在杂波协方差矩阵估计精度不变的情况下,由于 STAP 时域自由度的降低,算法所需训练样本总数减少为

$$L' = \frac{2MN}{K} \quad (7)$$

在每一个子 CPI 脉冲维度由 M 降低为 $M' = M/K$ 的同时,每一个距离单元的慢时间维数据都提供了 M 个 NM' 维的空时快拍,根据(3)式和(5)式所表征的雷达时域平稳性,它们可以作为训练样本联合估计杂波协方差矩阵。当系统的 1 个 CPI 内脉冲数较多时, K 可以取得较大,则每一个距离单元可提供的训练样本数呈 K 倍增加。此时相应地,距离向快时间维所需的训练样本数变为

$$L_{\text{new}} = \frac{L'}{K} = \frac{2MN}{K^2} \quad (8)$$

显然, L_{new} 相对于 $L = 2NM$ 的数目大大减小,即可能只需要 CUT 附近极其少量的距离单元数据参与协方差矩阵的估计。而在较短的距离之内,机载

雷达杂波的距离依赖性可以近似看作是多普勒频率随距离发生较小的线性变化或者不变化,因此,由待检测距离单元前后相邻几个单元的联合时间(快-慢时间)维回波数据样本估计得到的协方差矩阵可以近似代替真实的杂波协方差矩阵,即

$$\hat{\mathbf{R}}'_c = \frac{1}{L'} \sum_{j=1}^{L_{\text{new}}} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}_k \mathbf{x}_{k,j}^H \mathbf{x}_{k,j} = \mathbf{Y}_{kj} \otimes \mathbf{Z}_j \quad (9)$$

式中: $\mathbf{x}_{k,j}$ 为降维后由联合时间维数据向量与空域采样数据所构成的空时快拍, k ($k = 1, 2, \dots, K$) 和 j ($j = 1, 2, \dots, L_{\text{new}}$) 分别为慢时间和快时间维数据向量序号。

2.2 非平稳杂波抑制方法

根据(9)式估计出的杂波协方差矩阵,运用自适应滤波算法,得到空时二维处理器的自适应权矢量:

$$\mathbf{W}(\psi, f_D) = \frac{\hat{\mathbf{R}}'_c{}^{-1} \mathbf{S}'(\psi, f_D)}{\mathbf{S}'^H(\psi, f_D) \hat{\mathbf{R}}'_c{}^{-1} \mathbf{S}'(\psi, f_D)} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{S}'(\psi, f_D) = \mathbf{a}'(\omega_t) \otimes \mathbf{b}(\omega_s)$ 为降维后的空时导向矢量^[1], $\mathbf{a}'(\omega_t) = [1 \quad e^{j\omega_t(f_D)} \quad \dots \quad e^{j(M-1)\omega_t(f_D)}]^T$, $\mathbf{b}(\omega_s) = [1 \quad e^{j\omega_s(\psi)} \quad \dots \quad e^{j(N-1)\omega_s(\psi)}]^T$; ψ 为散射体的入射锥角; f_D 为多普勒频率。由于慢时间维数据所具有的平稳性特征,可以将该权值应用到待检测距离单元每一个子 CPI 的回波信号中,避免了每个子 CPI 分别进行杂波协方差矩阵求逆的运算,降低了系统的复杂度。

另外,在 CPI 分段过程中,STAP 的时域自由度由 M 减小到 $M' = M/K$,存在严重的孔径损失,这会降低目标信号的增益和自适应杂波抑制性能。但由于各子 CPI 是均匀划分的,且通常不考虑时域采样的误差因素,它们的导向矢量之间存在着固定的相位关系^[17]。因此,在对每一个子 CPI 进行单独滤波处理后,通过对输出信号进行相干叠加,可以提高 STAP 系统的输出 SINR,补偿降维带来的时域孔径损失。据此构建的 STAP 非平稳杂波抑制方法实现框图如图 4 所示。

2.3 性能分析

上述的基于联合时间维训练样本的非平稳杂波抑制方法本质上是利用时域分段的降维方式,牺牲部分时域自由度,换取慢时间维的训练样本个数,以减小杂波协方差矩阵估计时对距离向训练样本数量的要求,从而达到减小杂波非均匀程度的目的。

其中,CPI 分段参数 K 的取值至关重要。如果

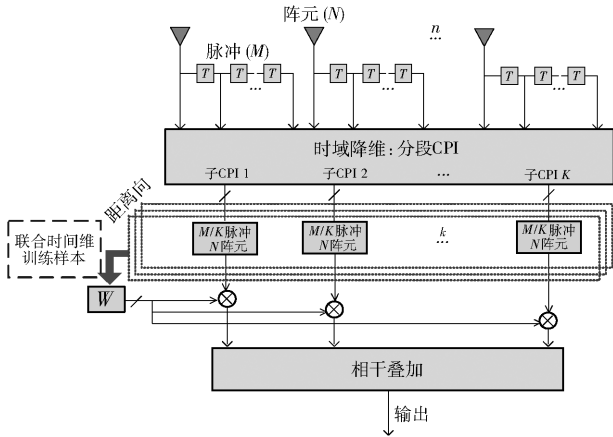


图 4 本文方法的 STAP 实现框图

Fig. 4 Block diagram of the proposed STAP algorithm

K 取得越小, CPI 分段后所得慢时间维的样本数越少, 相应所需的距离向快时间维样本数就越多, 导致杂波距离依赖性增加, 该方法能起到的改善效果下降; 相反, 如果 K 取得较大, 子 CPI 的长度 M' 就越小, 自适应滤波器的自由度减小, 则系统抑制杂波和干扰的能力下降。因此, 实际中需要综合考虑系统所具有的脉冲总数和距离向杂波的非均匀程度。如 HPRF 的预警雷达系统中, 1 个 CPI 内具有较多的相干脉冲, 如果降维后其时域自由度能够满足抑制杂波和干扰的要求, 则可以取较大的 K 值, 既能够为协方差估计提供尽量多的慢时间维训练样本, 也能够大大降低系统的运算复杂度。而在杂波非均匀程度方面, 机载雷达的杂波距离依赖性通常出现在非正侧视、共形阵天线或双基地配置的情形中, 距离向快时间维各单元的回波多普勒与天线的偏置角或双基地角有关, 但相邻单元的多普勒频率变化缓慢或短距离内近似线性变化。由后面的仿真可以看到, 在非正侧视阵雷达模型下, 尤其当天线偏置角较小时, 相邻近的 10 余个距离单元的多普勒频率都近似相等, 能够满足大多数情况下该方法对距离向样本的需求。

3 仿真验证

以下仿真基于机载非正侧视阵雷达模型, 验证本文方法在改善杂波距离依赖性方面的性能。设阵列轴线与载机平台运动方向的夹角为偏置角 θ_p , 显然当 $\theta_p = 0^\circ$ 时, 雷达为正侧视的特殊情形; 当 $\theta_p = 90^\circ$ 时, 雷达为前视阵。仿真中系统的具体参数选取如表 1 所示。

算例中存在距离依赖性的近程杂波区域主要是指不产生距离模糊的近程雷达主瓣照射区域, 图 5

表 1 机载雷达系统仿真参数列表

Tab. 1 List of simulation parameters of airborne radar

参数	数值
载机高度 H/m	8 000
载机飞行速度 $v_a/(m \cdot s^{-1})$	150
地球曲率半径 R_e/km	6 378
偏置角 $\theta_p/(\circ)$	30
主波束指向与天线阵面夹角 $/(\circ)$	90
杂噪比 CNR/dB	50
工作波长 λ/m	0.24
发射信号带宽 B/MHz	2
脉冲重复频率 f_r/Hz	4 000
子阵数 N	8
脉冲数 M	256

为在不同偏置角时该区域内杂波多普勒频率随距离单元 (l) 变化的情况, 可以看到当 $\theta_p \neq 0^\circ$ 时, 机载非正侧视阵雷达的近程杂波具有距离依赖性, 但在相邻近的距离单元变化缓慢或近似线性变化。取 $\theta_p = 30^\circ$, 雷达在方位-多普勒平面上的杂波分布如图 6 所示, 表现为上半个椭圆, 如果考虑天线的背瓣电平, 则杂波分布呈一个斜椭圆。

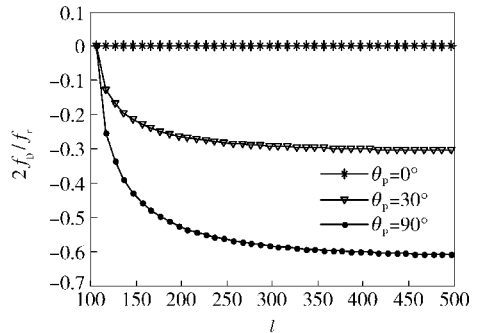


图 5 杂波多普勒频率随距离变化情况

Fig. 5 Doppler frequency for different range cells

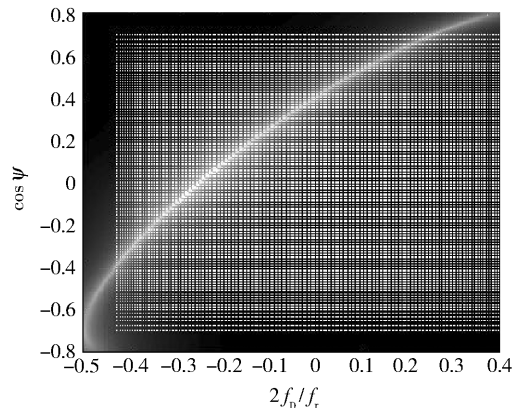
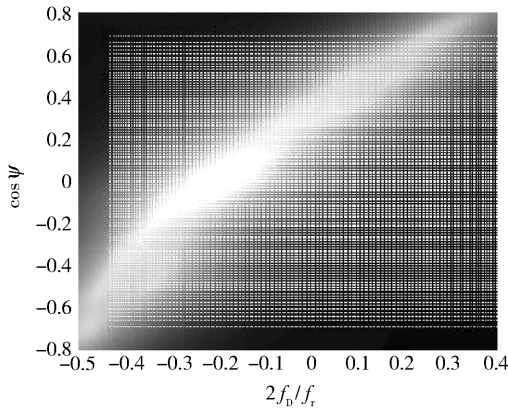


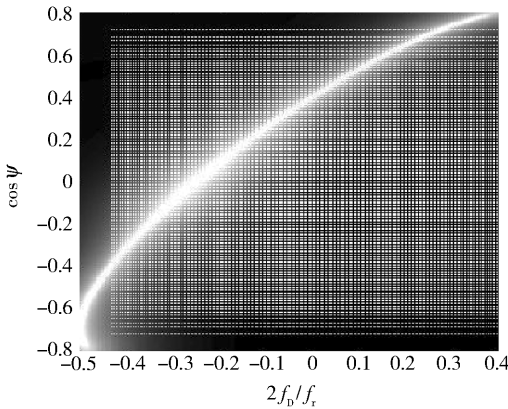
图 6 协方差矩阵已知时的杂波谱

Fig. 6 The clutter spectra with known covariance matrix

假设选取近程范围内的第 175 号距离门为 CUT,时域降维处理时子 CPI 脉冲数为 $M' = 8$,则根据 RMB 准则,常规方法需要在 CUT 相邻两侧共选取 $L' = 2NM' = 128$ 个训练样本,即采用除去两个保护单元后的第 111 ~ 239 号距离门的回波数据,估计可得杂波的方位-多普勒平面分布图如图 7(a)所示。按照本文的联合时间维样本训练方法可知,当一个 CPI 内的脉冲数为 $M = 256$ 时,每一个距离单元可以获得 $K = M/M' = 32$ 个训练样本,则距离向只需要 $L_{\text{new}} = L'/K = 4$ 个样本,即采用除去两个保护单元后的第 172 ~ 178 号距离门的回波数据,估计得到杂波分布如图 7(b)所示。对比可以看到,由于雷达近程区域杂波存在距离依赖性,常规样本选取方法选用了较多的距离维数据($L' = 128$)作为训练样本,导致杂波谱严重展宽,尤其不利于主瓣杂波的抑制和慢速运动目标检测;而后者因为样本总数不变,仍然可以准确得到杂波分布谱图,但由于距离维选用的样本($L_{\text{new}} = 4$)大大减少,从而有效降低了杂波



(a) 常规样本选择方法
(a) By conventional method



(b) 联合时间维的样本选择方法
(b) By proposed method

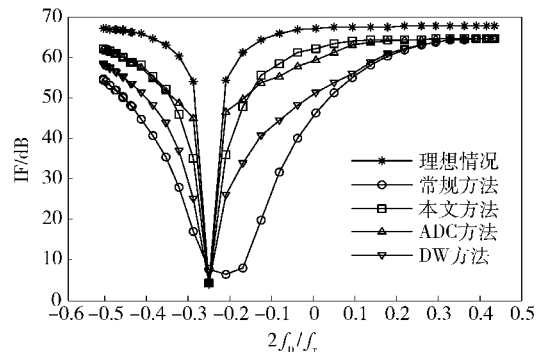
图 7 2 种方法估计得到的杂波谱

Fig. 7 The clutter spectra obtained by estimated covariance matrixes

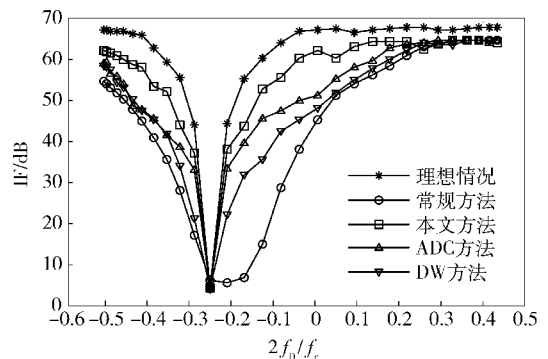
距离依赖性对协方差矩阵估计造成的影响,得到的二维谱图更加接近理想情况,如图 6 所示。

图 8 所示的曲线分别描述了采用常规样本选择方法(常规方法)、联合时间维训练样本的方法(本文方法)、ADC 方法和 DW 方法 4 种不同算法以及理想情况下 STAP 系统的 SIRM 改善因子(IF),其中假设理想情况下的杂波协方差矩阵是已知的,能够得到最优处理结果。由图 8(a)可以看出,无论是在主瓣区域还是在整个频率轴,本文方法相对于常规方法都有较大的杂波抑制性能提升,IF 更加接近理想情况下的最优处理。尤其是本文方法在主瓣区域的零陷较窄,更加有利于系统对慢速运动目标的检测。再与常见的 ADC 方法和 DW 方法比较可知,当不存在系统误差时,本文方法的主瓣杂波抑制性能相比 ADC 方法稍差,但相对于 DW 方法的 IF 平均提高了约 11.3 dB,能够满足大多数系统的性能要求。另外,由于本文方法相对于常规 STAP 方法几乎不增加计算量,因此相比 ADC 方法庞大的计算复杂度而言,本文方法具有较高的运算效率。

图 8(b)是在考虑了实际系统存在通道幅相误差(幅度误差 5%,相位误差 5°)和 ICM(风速 10 m/h)情况下,上述 4 种方法的杂波抑制性能变



(a) 没有系统误差
(a) With no error



(b) 存在系统误差
(b) With some system error

图 8 不同方法时系统的改善因子比较

Fig. 8 SINR improvement factors for different algorithms

化。ADC 方法和 DW 方法需要利用部分系统参数进行各距离单元的杂波补偿,因此当系统存在误差时性能下降严重;而本文方法是利用了不同训练样本选取策略解决的杂波非平稳问题,因此具有较强的稳健性,能够表现出相对于 ADC 方法和 DW 方法更优的距离依赖性改善性能。

4 结论

基于统计的自适应算法都需要计算接收数据的协方差矩阵,获得匹配滤波权值才能实现自适应处理,因此是否准确估计了杂波协方差矩阵就决定了 STAP 方法的性能好坏。针对机载雷达杂波距离依赖性问题,本文不同于常规的回波数据补偿或参数估计类方法,而是在降维的基础上,利用脉冲雷达回波数据时域平稳性,通过改变协方差矩阵估计时的训练样本选取策略来提高估计精度,并对降维输出进行相干叠加,形成了一种新的非平稳杂波抑制方法。所提方法从影响性能的根本原因出发,实现过程简单,为非平稳杂波环境下实现高精度降维 STAP 提供了新的解决途径;同时仿真了实际系统误差的影响,表现出工程应用中所具备的稳健性。

参考文献 (References)

[1] 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: 46-50.
WANG Yong-liang, PENG Ying-ning. Space-time adaptive processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 46-50. (in Chinese)

[2] Reed I S, Mallett J D, Brennan L E. Rapid convergence rate in adaptive arrays[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System, 1974, 10(6): 853-863.

[3] 赵军, 朱兆达. 非正侧视阵列机载雷达多空间角补偿算法[J]. 航空学报, 2010, 31(11): 2216-2220.
ZHAO Jun, ZHU Zhao-da. A multiple space angle compensation method for airborne radar with non-sidelooking uniform linear arrays[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(11): 2216-2220. (in Chinese)

[4] 段克清, 谢文冲, 王永良. 共形阵机载雷达杂波非平稳特性及抑制方法研究[J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(12): 1507-1516.
DUAN Ke-qing, XIE Wen-chong, WANG Yong-liang. Nonstationary clutter suppression for airborne conformal array radar[J]. Science China-Series F: Information Sciences, 2011, 41(12): 1507-1516. (in Chinese)

[5] Beau S, Marcos S. Taylor series expansions for airborne radar space-time adaptive processing[J]. IET Radar, Sonar, Naviga-

tion, 2011, 5(3): 266-278.

[6] Kreyenkamp O, Klemm R. Doppler compensation in forward-looking STAP radar[J]. IET Radar, Sonar, Navigation, 2001, 148(5): 253-258.

[7] Himed B, Zhang Y H, Hajjari A. STAP with angle-Doppler compensation for bistatic airborne radar[C]//Proceedings of the IEEE National Radar Conference. Long Beach, CA, USA: IEEE, 2002: 311-371.

[8] Lapierre F D, Droogenbroeck M V, Verly J G. New methods for handling the range dependence of the clutter spectrum in non-side looking monostatic STAP radars[C]//International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP'03). Hongkong: IEEE, 2003: 73-76.

[9] Michels J H, Himed B, Rangaswamy M. Evaluation of the normalized parametric adaptive matched filter STAP test in airborne radar clutter[C]//IEEE International Radar Conference. Washington DC: IEEE, 2000: 769-774.

[10] Nert X, Acheroy M, Verly J G. Maximum likelihood range dependence compensation for STAP[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP'07). Hawaii, USA: IEEE, 2007: 913-916.

[11] Kogon S M, Zatman M. Bistatic STAP for airborne radar systems[C]//Proceedings of the ASAP Workshop. Lexington: Massachusetts Inst of Tech Lexington Lincoln Lab, 2001: 1-26.

[12] Lim C H, Aboutanos E, Mulgrew B. Training strategies for joint domain localized-space-time adaptive processing in a bistatic environment[J]. IET Radar, Sonar, Navigation, 2006, 153(6): 516-524.

[13] Cristallini D, Burger W. Strategies for sub-optimal air to air STAP in forward looking configuration[C]//Proceedings of the 7th Europe Radar Conference (EuRAD 2010). Paris: IEEE, 2010: 308-311.

[14] 吴洪, 王永良, 武文. 非均匀杂波环境下线性预测类空时自适应处理性能分析[J]. 自然科学进展, 2007, 17(1): 86-92.
WU Hong, WANG Yong-liang, WU Wen. The performance analysis of linear-prediction-type STAP methods in non-homogeneous environment[J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(1): 86-92. (in Chinese)

[15] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
ZHANG Xian-da, BAO Zheng. Non-stationary signal analysis and processing[M]. Beijing: National Defense Industry, 2001. (in Chinese)

[16] Wang Y L, Bao Z, Peng Y N. STAP with medium PRF mode for non-side-looking airborne radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System, 2000, 4(36): 609-620.

[17] 赵申东, 唐劲松, 蔡志明. 小快拍数的线阵空时自适应处理方法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(9): 1616-1620.
ZHAO Shen-dong, TANG Jin-song, CAI Zhi-ming. Space-time adaptive processing for line array with a small number of snapshots[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(9): 1616-1620. (in Chinese)