

非均匀环境下利用杂波脊信息的杂波滤除方法研究

周宇 张林让 刘楠 刘昕

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文针对空时自适应检测训练样本中含有干扰目标会导致目标检测性能下降的问题, 提出一种利用杂波脊先验信息滤除杂波的方法, 使目标检测不受训练样本中干扰目标的影响, 并且提高了小样本情况下的检测性能。利用机载雷达地杂波在角度多普勒空间的分布特点, 结合杂波 2 维高斯功率谱密度模型, 构造杂波协方差矩阵用于滤除对目标有遮蔽影响区域内的杂波。模型参数的设定充分结合了环境先验信息, 使参数设定快速准确。通过仿真数据和 MCARM 实测数据的仿真实验, 结果表明在训练样本被干扰目标污染和小样本情况下, 利用杂波脊信息的杂波滤除方法均能有效滤除杂波, 检测性能高于传统的自适应检测方法。

关键词: 雷达信号处理; 空时自适应处理; 杂波脊; 先验信息; 干扰目标

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)06-1332-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01104

Study on Exploring Knowledge of the Clutter Ridge for Clutter Suppression in Heterogeneous Environments

Zhou Yu Zhang Lin-rang Liu Nan Liu Xin

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Space Time Adaptive Processing (STAP) shows notable performance degradation when secondary data is contaminated by target-like signals or only a small number of secondary data is available. To solve the problem, a new methodology exploring characteristic structure of clutter ridge is proposed to suppress clutter which obscure objects. The phase spectra of ground clutter seen by an airborne radar are taken account of and a covariance matrix is obtained incorporating two-dimension Gaussian power spectral density model. The parameter of the model can be obtained by exploring the sensed environment. Simulation based on simulated data and MCARM real data show that noticeable performance improvements can be obtained with the new approach in heterogeneous environments.

Key words: Radar signal processing; Space-Time Adaptive Processing (STAP); Clutter ridge; Prior knowledge; Target-like signal

1 引言

机载阵列雷达必须具有抑制地面强杂波的能力从而实现低空飞行目标和地面运动目标的检测。通过近 30 年的研究, 空时自适应处理(Space Time Adaptive Processing, STAP)成为应用于机载阵列雷达的重要技术, 因为 STAP 能够用来抑制干扰, 滤除地面强杂波^[1]。通常的 STAP 处理方法都是使用临近待测单元的多个训练数据构造杂波协方差矩阵。均匀杂波环境下(训练样本相互独立且与待测样本同分布), 样本数量大于两倍的系统自由度^[2]时, 系统达到接近最优(性能损失小于 3 dB)杂波抑制效果。但由于多变的地表类型、地形高程、植被覆盖

等情况, 以及群目标间的相互干扰, 孤立干扰等等原因, 雷达通常都工作在非均匀环境中^[3]。同时, Melvin 和 Ohnishi 等人指出在各种造成环境非均匀的原因中, 训练数据中含有目标的现象(Targets in the Secondary Data, TSD)对 STAP 的检测性能影响较大^[4,5]。非均匀训练数据不符合样本独立同分布的要求, 直接用其估计协方差矩阵会导致检测性能明显下降^[5]。常用的解决此类问题的方法是使用非均匀检测器(NonHomogeneity Detector, NHD)进行训练样本选择^[6]。这类方法一定程度上能提高非均匀情况下的检测性能, 但存在两个问题: (1)多数 NHD 也需要计算样本协方差矩阵, 所以其性能也受样本中干扰目标的影响^[7]; (2)在非均匀现象严重时, 由于 NHD 剔除非均匀样本使可用的样本数更少, 小样本情况下检测性能仍无法得到有效提高。

2009-08-21 收到, 2010-02-08 改回

通信作者: 周宇 zhouyu@mail.xidian.edu.cn

解决上述问题的一个重要的思路就是发掘并利用机载雷达探测环境相关的先验知识,实现认知的基于先验知识的信号处理方法^[8-10]。基于知识的空时自适应处理技术(KA-STAP)^[11]近几年受到广泛关注,美国 Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) 的 Knowledge-Aided Sensor Signal Processing Expert Reasoning (KASSPER) 项目就将 KA-STAP 作为重要研究内容^[10]。实际上利用先验知识的方法分为两个基本的大类。第一类属于间接法,利用先验知识选择合适的训练样本计算协方差矩阵^[8,12];第二类是直接法,就是直接将先验知识融入到滤波器的设计中^[8,9,13-16]。

对于机载阵列雷达接收到的地面杂波,其杂波脊(杂波功率谱密度在角度多普勒平面的轨迹)具有一定的特点,如正侧面阵机载雷达的杂波分布轨迹为直线,斜侧面阵雷达的杂波分布轨迹为斜椭圆,前向阵雷达的杂波分布轨迹为正椭圆^[1]。杂波脊具有这些特点是因为机载雷达的杂波谱只与雷达平台速度和雷达系统工作参数有关,而与杂波统计特性无关。本文提出了一种在非均匀环境中稳健的滤除杂波的方法,该方法同广义相邻多波束(Generalized Multiple Beams, GMB)^[17],局域联合处理(Joint Domain Localized, JDL)^[18]等算法在角度多普勒平面局域化杂波的思路有相似之处,区别是本文提出的方法主要利用杂波脊的结构特点滤除杂波。为了利用这些特点,采用了一种简单的模型模拟杂波,并且充分结合了环境先验信息设定模型的参数。

2 检测模型

设机载雷达天线由 N_s 个阵元组成,一个相干处理时间内的脉冲数为 N_t ,将第 n 个阵元第 k 次快拍的接收数据记为 x_{nk} ,第 n 个阵元的阵列数据矢量为 $\mathbf{x}(n) = [x_{n1}, \dots, x_{nN_t}]^T$,将 $\mathbf{x}(n)$, $n = 1, 2, \dots, N_s$ 排成 $N_s N_t \times 1$ 的列矢量 \mathbf{x} ,即 $\mathbf{x} = [\mathbf{x}^T(1), \dots, \mathbf{x}^T(N_s)]^T$ 。

将雷达目标检测问题转化为如下的二元假设问题:

$$\mathbf{H}_0: \mathbf{x} = \mathbf{c} + \mathbf{n}, \quad \mathbf{H}_1: \mathbf{x} = \alpha \mathbf{s} + \mathbf{c} + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中 \mathbf{c} 是杂波分量, \mathbf{n} 为噪声分量,其中 \mathbf{s} 为目标导向矢量: $\mathbf{s} = \mathbf{s}_s \otimes \mathbf{s}_t$, 式中 $\mathbf{s}_s = [1, e^{jf_s}, \dots, e^{j(N_s-1)f_s}]^T$; $\mathbf{s}_t = [1, e^{jf_t}, \dots, e^{j(N_t-1)f_t}]^T$, f_t 和 f_s 分别表示空间和时间归一化频率^[1]。 α 是标量,表征目标的回波能量及信道衰减影响。 \mathbf{H}_0 情况下, $\alpha = 0$ 表示目标不存在; \mathbf{H}_1 情况下, $\alpha \neq 0$ 表示存在目标。

Brennan 等人提出的最优 STAP 处理器是通过 \mathbf{x} 进行线性加权实现,假设滤波器的权矢量为 $\mathbf{w} (N_s N_t \times 1)$,则处理器的输出为 $y = \mathbf{w}^H \mathbf{x}$ 。STAP

的最优权系数可通过线性约束优化问题得到

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = \mu \mathbf{R}^{-1} \mathbf{s} \quad (2)$$

μ 为归一化复常数,协方差矩阵 $\mathbf{R} = \mathbf{R}_c + \sigma^2 \mathbf{I}$, 其中 \mathbf{R}_c 为杂波协方差矩阵。实际情况下,式(2)中的 \mathbf{R} 是无法确知的,通常是用协方差矩阵的最大似然估计

$$\hat{\mathbf{R}}_x = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \mathbf{x}_l \mathbf{x}_l^H$$

代替, L 表示训练样本数量。对于 STAP 的降维情况,不管降维处理如何进行,总可以等效成对全空时数据矢量施以一个 $N_s N_t \times r$ 的降维矩阵 \mathbf{T} , $N_s N_t$ 和 r 分别为降维前后的维数。降维后的杂波协方差矩阵为 $\mathbf{T}^H \mathbf{R}_c \mathbf{T}$ 。由于 \mathbf{R}_c 容易受样本非均匀,尤其是训练数据中含有干扰目标的影响,所以非均匀环境下,空时自适应处理的目标检测性能会下降。因此本文研究利用杂波脊的信息估计杂波协方差矩阵,避免了训练样本中的干扰目标对检测性能的影响。

3 根据杂波脊信息构造杂波协方差矩阵滤波

机载雷达杂波在角度多普勒空间的分布轨迹由载机速度,阵元间距和雷达脉冲重复频率决定,这些参数对信号处理机来说是已知的。所以利用这些信息,可以估计出杂波脊在角度多普勒平面的位置信息。利用目标导向矢量和估计出的杂波轨迹,经过几何推导可以确定对目标检测有影响的杂波区域。这里以正侧视等距线阵为例,讨论利用杂波脊信息构造杂波协方差矩阵的方法。对于其他的阵型,虽然杂波脊轨迹不同,但处理的思路和方法类似。

杂波脊斜率为 1 时,其轨迹与目标导向矢量在归一化角度多普勒平面的位置关系如图 1 所示。图中的斜线表示杂波脊,小圈表示角度多普勒通道,这是 JDL^[18], GMB^[17]等降维算法在角度多普勒平面局域化杂波时常用的概念。每个通道在角度和多普勒方向的宽度分别表示空域角度和多普勒频率间隔。如果是通过 K 点 2 维 DFT 变换到该平面,则通道在两个方向的宽度均为 $1/K$ 。中间的实线圈表示目标导向矢量,根据它提供的角度多普勒信息,可以确定杂波脊上的对目标有影响的 I 区和 II 区杂波。周围的虚线小圈是通常 3×3 的 JDL 算法^[18]选取的辅助通道。从图 1 可以看出,杂波抑制的主要目标就是滤除 I 区和 II 区杂波。JDL^[18], GMB^[17]等算法是利用目标周围的角度多普勒通道的信息滤除该区域杂波,本文研究利用杂波脊轨迹先验信息直接滤除 I 区和 II 区杂波。

为了利用杂波脊轨迹信息,采用文献[18]中提出的地杂波模型。假定图 1 中的 I 区和 II 区杂波分别

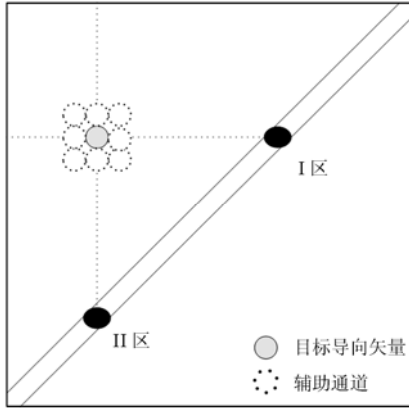


图 1 角度多普勒平面图

满足 2 维高斯功率谱密度,

$$P_c(f_t, f_s) = \frac{\sigma_c^2}{2\pi\sigma_{ft}\sigma_{fs}} \exp\left[-\left(\frac{(f_t - f_{ct})^2}{2\sigma_{ft}^2} + \frac{(f_s - f_{cs})^2}{2\sigma_{fs}^2}\right)\right] \quad (3)$$

其中 f_t 和 f_s 分别表示归一化的多普勒频率和空域频率^[1], 此功率谱密度函数在角度多普勒空间中表现为中心在 $[f_{cs}, f_{ct}]$, 功率为 σ_c^2 的谱峰, 其在角度和多普勒方向的展宽分别由 σ_{fs} 和 σ_{ft} 控制。则该谱峰对应的杂波协方差矩阵为 $\mathbf{R}_{cd} = \sigma_c^2 \mathbf{C}_s \otimes \mathbf{C}_t$, 其中 \mathbf{C}_s 和 \mathbf{C}_t 都是 Toeplitz 矩阵,

$$\mathbf{C}_t = \text{Toeplitz} \left\{ \left[1, e^{-2(\pi\sigma_{ft})^2 - i2\pi f_{ct}}, \dots, e^{-2(\pi\sigma_{ft}(N_t-1))^2 - i(N_t-1)2\pi f_{ct}} \right] \right\} \quad (4)$$

$$\mathbf{C}_s = \text{Toeplitz} \left\{ \left[1, e^{-2(\pi\sigma_{fs})^2 - i2\pi f_{cs}}, \dots, e^{-2(\pi\sigma_{fs}(N_s-1))^2 - i(N_s-1)2\pi f_{cs}} \right] \right\} \quad (5)$$

对于确定的每个目标对应的 I 区和 II 区杂波, 用上述的杂波功率谱密度表示这些区域的杂波, 则总的杂波协方差矩阵就是将这些单个谱峰所对应的杂波协方差矩阵 \mathbf{R}_{cd} 相加。其中的未知参数包括 σ_c^2 , σ_{fs} , σ_{ft} 和每个谱峰的中心位置 $[f_{cs}, f_{ct}]$, 估计出这些参数, 就可得到杂波协方差矩阵 \mathbf{R}_c 。

使用估计出的 \mathbf{R}_c 代替通常检测模型式(2)中的协方差矩阵 \mathbf{R} , 计算滤波器相应的权系数 \mathbf{w} ; 同样的思路也可应用于 STAP 降维算法中。这是一种开环的杂波抑制方法, 具有运算量小、没有收敛过程等优点, 模型参数可以预先根据环境信息设定。由于 \mathbf{R}_c 中包含所有对目标有淹没影响的杂波区域的杂波信息, 使用 \mathbf{R}_c 设计的滤波器能有效抑制杂波。同时由于没有使用训练样本相加求平均的最大似然方法估计协方差矩阵, 训练样本中存在的干扰目标和孤立干扰^[1]对检测性能不造成影响。为了说明和分析利用杂波脊信息滤除杂波的效果, 本文考虑仅有

地杂波情况, 暂不考虑存在阻塞干扰(Jammer)的情况。

4 模型参数设定说明

在协方差矩阵 \mathbf{R}_c 的参数中, 杂波谱峰的中心位置参数 $[f_{cs}, f_{ct}]$ 至关重要, 它决定滤波器能否完全滤除对目标有淹没影响的杂波。如图 1, 根据目标的导向矢量和杂波脊的斜率, 经过精确的几何计算, 能够估计出 I 区和 II 区杂波的位置, 从而也就确定杂波谱峰的位置。杂波脊的斜率可以通过平台运动速度、阵元间距和脉冲重复频率等参数计算得到, 这些系统参数都是事先已知, 并且可以随环境动态更新的。

对于模型的其他参数, 理论上可以利用最大似然方法基于训练数据估计, 但这样的估计过程很复杂, 参数估计值无法随着杂波环境的动态变化而变化。如图 1 所示, 经过几何推导估计出杂波谱峰的位置后, 对于放置在该位置的上的杂波谱峰的宽度和功率, 只要满足比该位置杂波脊的宽度和功率值大的要求即可。考虑到本文的方法对参数 σ_c^2 , σ_{fs} , σ_{ft} 的精度要求不高, 所以使用根据经验获得的杂波脊的宽度和功率信息作为这些参数的估计值。这样的参数估计过程简单, 使参数能够随着杂波环境的剧烈变化而变化。后续的仿真工作也表明杂波抑制效果对这些参数变化并不敏感。

本文借助 JDL^[18], GMB^[17]算法中角度多普勒通道的概念估计 σ_c^2 , σ_{fs} , σ_{ft} 。对于 K 点的 2 维 DFT 变换, 杂波脊上分布着 K 个角度多普勒通道, 但每个通道的功率分布并不均匀, 杂波功率主要集中在主瓣区域。为了避免杂波剩余功率, 选取模型的参数 σ_c^2 等于待测距离单元总的杂波功率 P_c , 这样就有足够的功率对消 I 区和 II 区杂波。由于这种方法认为总的杂波功率都全部分布在上述区域内, 估计出的功率会偏大, 造成该区域杂波抑制凹口偏深, 但这样不会影响最终性能, 反而是有利于更大程度上滤除杂波。在角度多普勒平面, 空间角度和多普勒频率都归一化, 确定了杂波脊上分布的通道数, 就能确定对应的归一化角度间隔和多普勒频率间隔。为了简化问题, 本文假定杂波谱峰的宽度 σ_{fs} , σ_{ft} 分别等于归一化角度间隔和多普勒频率间隔。

针对不同的雷达探测区域和雷达系统参数, 杂波脊的宽度和功率是变化的。所以上述对于杂波谱峰的宽度和功率估计只是初始估计, 根据不同的工作环境和雷达参数配置可以重新设定参数。实际应用中设定模型参数的方法有很多种, 合理利用各种先验知识^[8,9], 能实现快速准确的参数设定, 这里主

要介绍两种基于知识的参数设定思路，便于工程实现时采用。

(1)收集雷达探测区域的信息，包括现有的各种文献数据库提供的地图数据、地形、地表覆盖类型，以及其他传感器获取的该区域的信息，同一雷达之前的获取的回波数据等等信息。结合雷达的不同参数配置，计算出不同环境下的杂波谱峰宽度和功率参数值，将这些参数存储，在雷达检测过程中，根据探测环境动态选择合适的参数值。由于大部分的参数估计过程是离线完成的，所以仅占用很少的雷达探测过程中的系统资源。

(2)机载雷达通常的信号处理过程在一个相干处理时间(Coherent Process Interval, CPI)内进行，在处理某一 CPI 内回波数据时，很少利用其他 CPI 内获得的回波信息。对于本文模型，可以利用其他 CPI 内获取的回波信息估计模型参数。这一方法可以在第一种方法中离线估计出的参数效果都不好时使用。

5 仿真分析

分别用仿真数据和 MCARM 实测数据仿真，验证非均匀杂波环境下，利用杂波脊信息的杂波滤除效果。两组仿真数据中均选取 $K = 128$ ，则方位角度间隔和多普勒频率间隔均为 $1/K$ 。则模型 $\sigma_{fs} = \sigma_{ft} = 1/K$ ， $\sigma_c^2 = P_c$ ，其中 P_c 为杂波功率，可通过训练数据估计得到。

5.1 仿真数据

计算机仿真采用如下参数：阵元数 $N_s = 16$ ，一个相干处理时间内的脉冲数为 $N_t = 64$ ，载机速度 $v = 140 \text{ m/s}$ ，飞机高度 $H = 3000 \text{ m}$ ，雷达波长 $\lambda = 0.2 \text{ m}$ ，阵元间距 $d = 0.10 \text{ m}$ ，脉冲重复频率 $f_r = 2800 \text{ Hz}$ ，天线波束指向阵面法向方向，运动目标方位角约为 95° ，多普勒频率 $f_d = 0.25f_r$ 。

图 2 为某距离单元回波数据滤波前后的空时 2 维杂波功率谱(这里采用似然谱，也可用常用的傅氏谱，但傅氏谱一般谱宽较宽，不利于观察变化情况)。对于正侧面阵，杂波脊斜率 $\beta = 2v/\lambda f_r = 1$ ，从图 2

(a)可以看出空时 2 维杂波谱在方位角多普勒平面上近似呈斜率为 1 的斜线带状分布。图 2 (b)为使用杂波脊构造的 R_c 滤波处理后的情况，可以看出动目标信号没有较大的损失，而对具有影响的 I 区和 II 区杂波被很好抑制。

改变参数 $f_r = 1500$ ，则 $\beta \approx 1.87$ ，由图 3 可见 β 不为 1 时的杂波脊轨迹发生变化，不再只有一条轨迹，但对目标有遮蔽影响的杂波区域的杂波均被很好抑制。说明本文的方法并不局限于 $\beta = 1$ 的情况，但由于整个平面的杂波轨迹增多，抑制杂波的凹陷区增多，此时要注意选择模型宽度参数，不可选择过大，防止目标被凹陷滤除。

图 4 为模型参数 σ_{fs} 和 σ_{ft} 加入 50% 随机误差时的情况，由图可见 I 区和 II 区杂波区的凹陷宽度有略微变化，但不影响杂波滤除效果，说明模型参数的较小误差对滤波性能影响不大，模型对参数有很强的容错性，这样有助于预先根据环境先验知识估计系统参数。

5.2 MCARM 数据

本节实验采用 MCARM 实测数据研究利用杂波脊先验信息滤除杂波的性能。MCARM 数据是美国 90 年代为研究 STAP 及其相关技术而实际录取的一批机载雷达数据。数据中包含了陆地、海面、城区、交通干线、陆海交界等典型地物，机载雷达在录取数据中不可避免地存在速度误差和阵元天线误差等，基本反映了机载雷达工作的真实环境。本文采用的 MCARM 数据编号为 RL050575，它包含了从 Delmarva 半岛上空采集的数据，载机从西经 75.972° 、北纬 39.379° 靠近马里兰切萨皮克港处起飞。由于阵面与速度矢量夹角为 7.28° ，由于阵面与速度夹角很小，可以按正侧视数据进行处理。主要参数为：雷达工作波长 $\lambda = 0.2419 \text{ m}$ ，阵元间距 $d = 0.1092 \text{ m}$ ，载机速度 $v = 100.2 \text{ m/s}$ ，脉冲重复频率 $f_r = 1984 \text{ Hz}$ 。考虑计算量的原因，仿真实验主要处理 360-450 号距离门中上面 11 子阵的 128 个脉冲数据，并且使用 JDL 降维算法降低计算量。

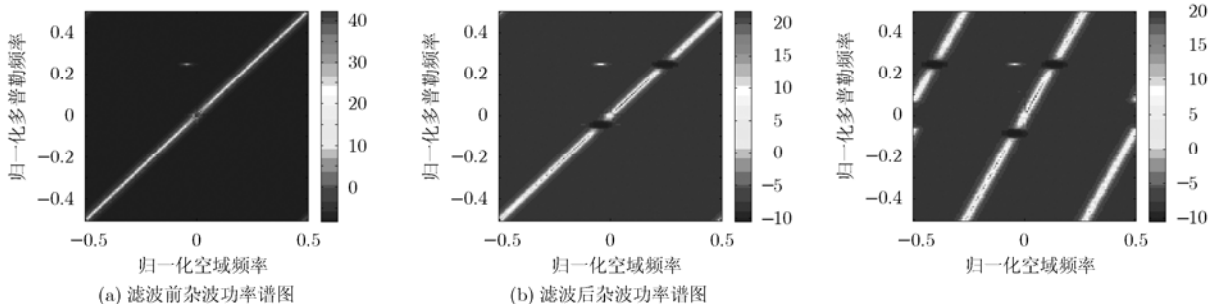


图 2

图 3 $\beta = 2.8$ 滤波后功率谱图

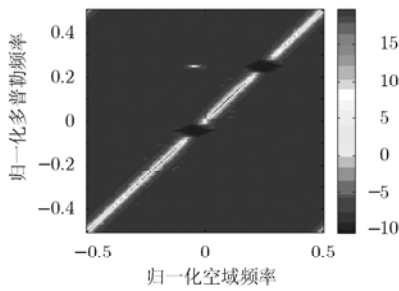


图 4 模型参数有误差时滤波后功率谱图

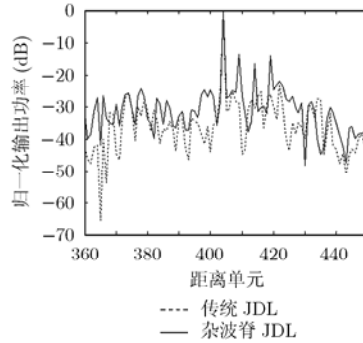


图 5 常规 JDL 与改进 JDL 滤波输出比较

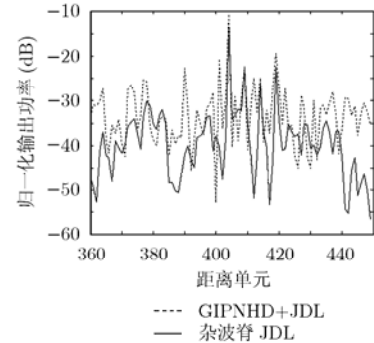


图 6 常规 GIP NHD+JDL 与改进 JDL 滤波输出比较

为了便于性能比较分析,在第 405 号距离单元注入信杂比为 -30 dB 的动目标信号,在第 410, 415, 420 号距离单元分别注入信杂比为 -45 dB 的动目标信号,目标信号方位角均为 90° ,多普勒频率均为 $f_d = -0.156f_r$,位于主杂波区。

图 5 中使用 3×3 的 JDL 降维算法^[18],系统自由度 $M = 9$,计算杂波噪声协方差矩阵的样本数 $L = 4M$,均从 360–450 号距离单元数据中选取,忽略待测目标所在距离单元及其相邻的两个距离单元。由图 5 可见,由于目标间的相互干扰,常规 JDL 算法仅将第 405 号距离单元的强目标信号从背景杂波中提取出来,其余 3 个弱动目标信号完全被残余杂波掩盖。利用杂波脊信息的算法不仅能检测到第 405 号单元的强目标,其余 3 个弱动目标输出功率也比剩余杂波功率高出近 10 dB 。

文献[6]指出使用 NHD 算法进行训练数据选择,能提高 STAP 的性能,但前提是有大量的训练样本可供选择并且其中有一定数量的均匀样本。小样本情况下 NHD 无法提高 STAP 检测性能,但利用杂波脊信息滤波的性能却不受小样本影响,能够获得较好的检测性能。图 6 中的自适应算法使用广义内积(General Inner product, GIP) NHD 进行样本选择,总的样本数为 12。从图中可以看出尽管进行样本选择,但由于总的样本数太少,3 个弱目标仍淹没在杂波中。而对于利用杂波脊信息滤波算法,滤波性能没有受样本数减少影响,3 个弱动目标输出功率仍比杂波功率高出约 $5\sim 8\text{ dB}$ 。

6 结束语

本文利用杂波脊轨迹在角度多普勒平面的分布仅与雷达平台运动速度、系统参数有关的特点,结合杂波 2 维高斯功率谱密度模型,构造杂波协方差矩阵,实现滤除对目标有遮蔽影响区域的杂波。模型参数设定充分结合了环境先验信息,使参数设定快速准确。通过仿真数据和 MCARM 实测数据的仿

真实验,结果表明在训练样本被干扰目标污染和小样本情况下,利用杂波脊信息的杂波滤除方法均能有效滤除杂波,检测性能高于传统的自适应检测方法。进一步的工作包括将本文的方法扩展到其他阵型,非正侧视情况;不仅考虑杂波信息,还考虑阻塞干扰信息。怎样更合理的根据环境先验知识选择模型参数,以及不同参数选择方法间的自动切换也需要进一步研究。

参考文献

- [1] Ward J. Space-time adaptive processing for airborne radar. Technical Report No. 1015, Lincoln Laboratories, December 13, 1994.
- [2] Reed S, Mallett J D, and Brenman L E. Rapid convergence rate in adaptive arrays [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 1974, 10(4): 853–863.
- [3] Melvin W L. Space-time adaptive radar performance in heterogeneous clutter [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 2000, 36(2): 621–633.
- [4] Melvin W L and Guerci J R. Adaptive detection in dense target environments [C]. Proceedings of the 2001 IEEE Radar Conference, Atlanta, GA, USA, 2001: 187–192.
- [5] Ohmishi K, Bergin J S, Teixeira C M, and Techau P M. Site-specific modeling tools for predicting the impact of corrupting mainbeam targets on STAP [C]. Proceedings of the 2005 IEEE Radar Conference, Alexandria, VA, May 9–12, 2005: 393–398.
- [6] Melvin W L, Wicks M C, and Brown R D. Assessment of multichannel airborne radar measurements for analysis and design of space-time processing architecture and algorithms [C]. IEEE International Radar Conference, Annapolis, MD, May, 1996: 130–135.
- [7] Bergin J S, Techau P M, Melvin W L, and Guerci J R. GMTI STAP in target-rich environment: site-specific analysis [C]. Proceedings of the 2002 IEEE Radar Conference, Long Beach, California, USA, 2002: 391–396.
- [8] Guerci J R and Melvin W L. Special section on

- knowledge-aided sensor signal and data processing [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 2006, 42(3): 983-1120.
- [9] Wicks M and Capraro G. Knowledge based signal processing, waveform diversity and systems engineering [C]. Proceedings of the 2008 IEEE Radar Conference, Rome, Italy, May 26-30, 2008: 1.
- [10] Capraro G T, Wicks M C, and Szczepanski W E. Waveform diversity and knowledge based signal processing in distributed radar [C]. Proceedings of the 2009 IEEE Radar Conference, Pasadena, California, USA, May 4-8, 2009: 1-6.
- [11] Guerci J R and Baranoski E J. Knowledge-aided adaptive radar at DARPA an overview [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2006, 23(1): 41-50.
- [12] Capraro C T, Capraro G T, Maio A D, Farina A, and Wicks M. Demonstration of Knowledge-aided space-time adaptive processing using measured airborne data [J]. *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(6): 487-494.
- [13] Stoica P, Li Jian, Zhu Xumin, and Guerci J R. On using a priori knowledge in space-time adaptive processing [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(6): 2598-2602.
- [14] Bidon S, Besson O, and Tournet J Y. Characterization of clutter heterogeneity and estimation of its covariance matrix [C]. Proceedings of the 2008 IEEE Radar Conference, Rome, Italy, May, 26-30 2008: 1-6.
- [15] Shackelford A K, Gerlach K, and Blunt S D. Partially adaptive STAP using the FRACTA algorithm [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 2009, 45(1): 58-69.
- [16] Maio A D, Farina A, and Wicks M. KB-GLRT: Exploiting knowledge of the clutter ridge in airborne radar [C]. *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, 2005, 152(6): 421-428.
- [17] Wang Y L, Chen J W, Bao Z, and Peng Y N. Robust space-time adaptive processing for airborne radar in nonhomogeneous clutter environments [J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic System*, 2003, 39(1): 70-81.
- [18] Wang H and Cai L. On adaptive spatial-temporal processing for airborne surveillance radar systems [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 1994, 30(3): 660-669.
- 周 宇: 男, 1978 年生, 博士, 研究方向为阵列信号处理、空时 2 维信号处理、自适应检测。
- 张林让: 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为阵列信号处理、自适应信号处理和雷达系统建模与仿真。
- 刘 楠: 男, 1981 年生, 博士, 研究方向为干涉合成孔径雷达信号建模与处理、地面动目标检测。
- 刘 昕: 男, 1983 年生, 博士, 研究方向为干涉合成孔径雷达信号建模与处理。