

## 一种抗密集欺骗式干扰的机载雷达动目标检测方法

同亚龙 王彤\* 代保全 吴建新

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 密集欺骗式干扰不仅会引起大量虚警,还会抬高恒虚警检测器的门限,导致机载雷达的动目标检测性能严重下降。针对此问题,该文提出一种基于数据拟合的机载雷达抗密集欺骗式干扰的动目标检测算法。该算法选取待检测单元附近的数据样本构造基矩阵,对待处理数据进行最小二乘拟合;同时,对拟合系数的边界进行自适应约束以保护可能存在的目标信号。该算法可以有效滤除密集欺骗式干扰,消除其带来的虚警,能够显著改善机载雷达的动目标检测性能。基于实测数据的实验结果验证了该算法的有效性。

**关键词:** 机载雷达; 动目标检测; 空时自适应处理; 欺骗式干扰; 数据拟合

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)03-0658-07

DOI: 10.11999/JEIT140679

## A Moving Target Detection Method to Suppress Dense Deception Jamming for Airborne Radar

Tong Ya-long Wang Tong Dai Bao-quan Wu Jian-xin

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

**Abstract:** The presence of dense deception jamming not only causes numerous false alarms but also raises the threshold of constant false alarm rate detector, which severely degrades the detection performance of airborne radar. To suppress the dense deception jamming, a moving target detection method based on data fitting is proposed. Firstly, a data basis matrix is constructed utilizing sample data adjacent to the cell under test, which is used to represent the test data in the form of least-square fitting. Simultaneously, an upper-bound constraint is adaptively calculated to protect target signals from being fitted. The proposed method can effectively suppress the dense deception jamming and significantly improve the moving target detection performance of airborne radar. The effectiveness of the proposed method is verified by the experimental results on measured radar data.

**Key words:** Airborne radar; Moving target detection; Space-Time Adaptive Processing (STAP); Deception jamming; Data fitting

### 1 引言

随着现代电子战技术和装备的快速发展,战场电磁环境日益复杂,机载雷达遇到前所未有的挑战,它不仅受到强的地(海)杂波的影响,还面临着各种干扰的威胁<sup>[1,2]</sup>。特别是数字射频存储器的出现与发展,使得干扰机能够截获、存储并调制转发雷达的发射信号,在雷达接收端形成类似目标信号的欺骗式干扰(在有的文献中也被称为相干转发式干扰)<sup>[3-6]</sup>。欺骗式干扰与雷达信号具有较强的相关性,经过接收机匹配滤波后可以获得比较高的脉冲压缩增益,引起大量虚警<sup>[4]</sup>。这些虚警不仅会抬高自动检测中的恒虚警(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测门限,

导致雷达系统的检测性能下降,而且还会占据大量雷达任务调度资源,使得雷达发现真实目标的时间延后,情况严重时甚至导致雷达计算机饱和而无法正常工作<sup>[6]</sup>。通常机载雷达可以采用空时两维自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)技术对具有空时耦合特性的地(海)杂波进行有效抑制,并能在一定程度上抑制干扰<sup>[7]</sup>。但在雷达回波中,欺骗式干扰往往以孤立点目标的形式随机存在,STAP无法获得足够的干扰样本来估计其统计特性,因此不能对其进行充分抑制。此外,训练样本中所存在的欺骗式干扰会破坏STAP的平稳环境假设,使其杂波抑制能力严重下降。为了能够在这种非平稳环境中获得稳健的杂波抑制性能,STAP通常需要级联非均匀检测器以剔除训练样本中的奇异样本<sup>[8]</sup>。但当密集欺骗式干扰存在时,会有大量奇异样本被剔除,STAP将无法获得足够的训练样本。同时,这些被剔除的奇异样本在STAP中无法得到抑制而依

2014-05-21 收到, 2014-07-18 改回

国家自然科学基金(61372133, 61101241)和中央高校基本科研业务费专项资金(K50511020008)资助课题

\*通信作者: 王彤 twang@mail.xidian.edu.cn

然表现为大量虚警。因此，研究抗密集欺骗式干扰的机载雷达动目标检测方法是很有必要的。

近年来，学者们提出了许多抗欺骗式干扰的方法。文献[9]指出脉冲分集技术是抗欺骗式干扰的有效方法，通过调整脉冲间的相位关系，使得匹配滤波时真实目标的回波信号得到相干积累，而干扰机转发的欺骗式干扰信号被削弱。但这种方法对发射波形要求较高，且会显著增加系统复杂度。文献[10]提出利用欺骗式干扰与真实目标在运动学特性上的差异对两者进行识别；文献[11]则基于雷达回波信号的幅度谱特征对欺骗式干扰进行识别；文献[12]先采用盲分离技术完成真实目标和欺骗式干扰的分离，然后利用相位量化差异对目标和干扰进行鉴别。这些方法都是基于欺骗式干扰与真实目标之间的某种差异，对其进行识别区分，从而在某种程度上达到抑制欺骗式干扰的目的，但它们都无法消除密集欺骗式干扰对数据处理算法及 CFAR 检测门限的影响。

针对以上问题，本文提出一种基于数据拟合的抗密集欺骗式干扰的机载雷达动目标检测方法。该方法首先选取待检测单元附近的数据样本来构造拟合基矩阵；然后对待检测单元数据及数据基矩阵进行目标阻塞，利用得到的辅助数据自适应计算优化约束边界；对待检测单元数据进行最小二乘拟合表示，并对拟合误差进行单元平均恒虚警 (Cell-Averaging Constant False Alarm Rate, CA-CFAR) 检测。同时，所提方法结合了降维 STAP 方法中的扩展因子化方法 (Extended Factored Approach, EFA)<sup>[13]</sup> 的算法框架，大大降低了算法复杂度及样本需求。该方法可以有效滤除密集欺骗式干扰，消除由其带来的虚警，改善了机载雷达的动目标检测性能。基于实测数据的实验结果验证了本文方法的有效性。

## 2 信号模型

为论述方便，本节信号模型以机载正侧视均匀线阵雷达为例进行说明，雷达系统几何关系如图 1 所示。需要说明的是本文算法对其他阵面构型及雷达工作模式也适用。载机以速度  $v$  沿  $Y$  轴正方向平行于地面飞行，高度为  $h$ ；雷达阵面由间距为  $d$  的  $N$  个阵元组成，在一个相干积累时间内发射  $M$  个脉冲；雷达工作波长为  $\lambda$ ，脉冲重复频率为  $f_r$ 。反射体相对于雷达的方位角和俯仰角分别为  $\theta$  和  $\varphi$ 。

在上述几何模型下，雷达接收机每一个距离门采样的空时 2 维回波数据可排列成  $MN \times 1$  维的数据

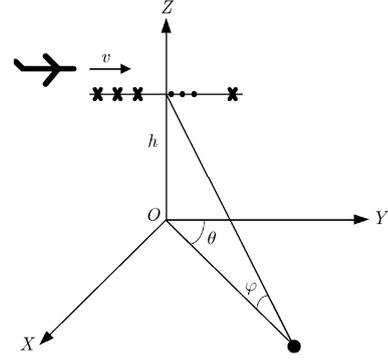


图 1 机载雷达系统几何示意图

矢量  $\mathbf{x} = [x_{11} \ x_{12} \ \cdots \ x_{1N} \ x_{21} \ x_{22} \ \cdots \ x_{2N} \ \cdots \ x_{M1} \ x_{M2} \ \cdots \ x_{MN}]^T$ ，常被称为一个空时快拍。机载雷达的动目标检测问题则可归结为对每一个空时快拍的二元假设检验问题：

$$\left. \begin{aligned} H_1 : \mathbf{x} &= \mathbf{x}_t + \mathbf{x}_j + \mathbf{x}_c + \mathbf{x}_n \\ H_0 : \mathbf{x} &= \mathbf{x}_j + \mathbf{x}_c + \mathbf{x}_n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中  $H_1$  和  $H_0$  分别表示存在或者不存在目标信号， $(\bullet)^T$  表示转置操作， $\mathbf{x}_t$ 、 $\mathbf{x}_j$ 、 $\mathbf{x}_c$  和  $\mathbf{x}_n$  分别表示目标信号、干扰信号、杂波信号和噪声。下面分别给出这 4 种信号的具体信号模型。

目标回波信号可表示为

$$\mathbf{x}_t = \alpha_t \mathbf{s}_t \quad (2)$$

其中  $\alpha_t$  表示目标回波信号的复幅度， $\mathbf{s}_t$  表示目标信号的空时 2 维导向矢量，其表达式为

$$\mathbf{s}_t = \mathbf{s}_{t,t}(f_{t,d}) \otimes \mathbf{s}_{t,s}(f_{t,s}) \quad (3)$$

其中  $\otimes$  表示 Kronecker 积操作， $\mathbf{s}_{t,t}$  和  $\mathbf{s}_{t,s}$  分别表示目标的时域和空域导向矢量，具体形式为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{s}_{t,t}(f_{t,d}) &= \begin{bmatrix} 1 & \exp(j2\pi f_{t,d}) & \exp(j2\pi f_{t,d}2) & \cdots \\ & \exp(j2\pi f_{t,d}(M-1)) & & \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{s}_{t,s}(f_{t,s}) &= \begin{bmatrix} 1 & \exp(j2\pi f_{t,s}) & \exp(j2\pi f_{t,s}2) & \cdots \\ & \exp(j2\pi f_{t,s}(N-1)) & & \end{bmatrix}^T \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中  $f_{t,d} = 2v_r/(\lambda f_r)$  表示目标信号的归一化多普勒频率， $v_r$  为目标相对于雷达的径向速度， $f_{t,s} = d \cos(\theta_t) \cos(\varphi_t)/\lambda$  表示目标信号的归一化空间频率， $\theta_t$  和  $\varphi_t$  分别为目标相对于雷达的方位角和俯仰角。

欺骗式干扰是由干扰机通过截获雷达的发射信号，并经过一定的调制之后转发给雷达的，具有与目标信号相似的信号形式，可表示为

$$\mathbf{x}_j = \alpha_j \mathbf{s}_j \quad (5)$$

其中  $\alpha_j$  表示欺骗式干扰信号的复幅度， $\mathbf{s}_j = \mathbf{s}_{j,t}(f_{j,d}) \otimes \mathbf{s}_{j,s}(f_{j,s})$  表示干扰信号的空时 2 维导向矢量， $f_{j,s} =$

$d \cos(\theta_j) \cos(\varphi_j)/\lambda$  表示干扰信号的归一化空间频率,  $\theta_j$  和  $\varphi_j$  分别为干扰机相对于雷达的方位角和俯仰角。干扰机可通过对归一化多普勒频率  $f_{j,d}$  和转发时延进行调整, 产生具有不同速度和距离的虚假目标, 对雷达进行速度欺骗干扰和距离欺骗干扰。

杂波信号可表示为<sup>[14]</sup>

$$\mathbf{x}_c = \sum_{p=1}^{N_r} \sum_{q=1}^{N_c} \alpha_{c,pq} \mathbf{s}_{c,pq} \quad (6)$$

其中  $N_r$  表示距离模糊数,  $N_c$  表示距离环中独立杂波散射体个数,  $\alpha_{c,pq}$  表示第  $p$  次模糊距离单元中第  $q$  个杂波块的回波幅度,  $\mathbf{s}_{c,pq}$  为其相应的空时 2 维导向矢量。

噪声信号  $\mathbf{x}_n$  主要由接收机噪声和环境噪声组成。其中接收机噪声可简单建模为高斯白噪声, 而环境噪声较为复杂, 具有一定的空域相关性<sup>[14]</sup>。

### 3 抗密集欺骗式干扰的动目标检测方法

从第2节信号模型可以看出, 欺骗式干扰与真实目标信号具有相同的信号形式, 但其多普勒频率和距离位置都是随机的, 在雷达回波中表现为孤立散射样本。一方面, 这会破坏传统 STAP 算法的平稳训练样本假设, 导致 STAP 的杂波抑制性能严重下降; 另一方面, 由于无法获得充足且平稳的欺骗式干扰样本, 使得传统 STAP 技术也不能够充分抑制这种干扰, 从而造成大量的虚警。本节给出一种基于数据拟合的抗密集欺骗式干扰的机载雷达动目标检测算法, 具体步骤为:

步骤 1 采用 EFA 算法对空时 2 维回波数据进行降维处理。在 STAP 雷达中, 由于空时数据维数  $MN$  一般较大, 使得全维处理算法运算量过大, 无法参与实时信号处理。在实际应用中, 一般都首先对雷达接收到的回波数据进行降维处理, 以降低运算量。在本文算法中, 采用 3 阶的 EFA 算法来进行降维处理。

下面以归一化多普勒频率为  $f_{d,0}$  的多普勒通道为例进行说明, 则 EFA 降维转换矩阵可以表示为

$$\mathbf{T}_{\text{EFA}} = \mathbf{F}_{\text{EFA}} \otimes \mathbf{I}_N \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_{\text{EFA}} = \begin{bmatrix} 1 & \exp(-j2\pi f_{d,-1}) & \cdots & \exp(-j2\pi f_{d,-1}(M-1)) \\ 1 & \exp(-j2\pi f_{d,0}) & \cdots & \exp(-j2\pi f_{d,0}(M-1)) \\ 1 & \exp(-j2\pi f_{d,1}) & \cdots & \exp(-j2\pi f_{d,1}(M-1)) \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中  $\mathbf{I}_N$  表示  $N \times N$  维的单位阵,  $f_{d,-1}$  和  $f_{d,1}$  分别为相邻多普勒通道对应的归一化多普勒频率。通过式 (9) 对全维的空时 2 维回波数据进行降维, 即

$$\mathbf{z} = \mathbf{T}_{\text{EFA}} \mathbf{x} \quad (9)$$

这样  $MN \times 1$  维的阵元脉冲域数据  $\mathbf{x}$  被转换为  $3N \times 1$  维的阵元多普勒域数据  $\mathbf{z}$ 。一般情况下都有  $M \gg 3$ , 使得经过本步骤的降维处理后, 数据维数大大减少, 从而大大降低了本文算法的运算复杂度。

待处理多普勒通道的目标空时 2 维导向矢量  $\mathbf{s}_t = \mathbf{s}_{t,t}(f_{d,0}) \otimes \mathbf{s}_{t,s}(f_{s,0})$ , 经过相同的降维变换处理后变为

$$\mathbf{s}_{t-\text{EFA}} = [0 \ 1 \ 0]^T \otimes \mathbf{s}_{t,s}(f_{s,0}) \quad (10)$$

其中  $f_{s,0}$  表示主波束所对应的归一化空间频率。

步骤 2 构造数据基矩阵。假设待处理多普勒通道的第  $k$  个距离门数据  $\mathbf{z}_k$  为待检测数据。在其附近(不包含待检测单元本身及其保护单元)选取  $L$  个数据样本构成  $3N \times L$  维的数据基矩阵:

$$\boldsymbol{\psi}_k = [\mathbf{z}_1 \ \mathbf{z}_2 \ \cdots \ \mathbf{z}_L] \quad (11)$$

这里要求数据样本个数  $L > 3N$ , 以保证所构造数据基矩阵的所有列矢量能够张成整个  $3N \times 1$  维的复矢量空间。对于统计 STAP 算法来说, 为防止目标自相消, 一般要求训练样本中不含目标信号<sup>[15]</sup>。此处本文也假设  $\boldsymbol{\psi}_k$  中选作基矢量的各数据样本中均不包含目标信号, 这一条件在绝大多数情况下都是成立的。

步骤 3 构造目标信号的阻塞矩阵, 并得到目标阻塞以后的辅助数据。目标阻塞矩阵的构造方式有很多种, 本文选择一种基于奇异值分解的构造方法<sup>[16]</sup>。对降维后的目标导向矢量  $\mathbf{s}_{t-\text{EFA}}$  进行如式 (12) 的奇异值分解:

$$[\mathbf{U}, \mathbf{S}, \mathbf{V}] = \text{svd}(\mathbf{s}_{t-\text{EFA}}^T) \quad (12)$$

其中  $\text{svd}(\bullet)$  表示奇异值分解操作,  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{V}$  分别为  $\mathbf{s}_{t-\text{EFA}}^T$  的左、右奇异向量矩阵,  $\mathbf{S}$  为奇异值矩阵。目标信号的阻塞矩阵可构造为

$$\mathbf{B} = [\mathbf{V}(:, 2:3N)]^T \quad (13)$$

由于在一个相干积累时间内, 雷达主波束指向保持不变, 故由式 (10) 可知, 对于 EFA 降维处理来说, 目标的降维导向矢量在同一个相干积累时间内不再随待检测单元的变化而变化, 因此本步骤构造的目标阻塞矩阵可以预先离线计算, 从而在一定程度上减少本文算法的运算量。

用式 (13) 所构造的目标阻塞矩阵对待检测单元数据及相应的数据基矩阵进行阻塞处理, 得到一组不含目标信号分量的辅助数据

$$\bar{\mathbf{z}}_k = \mathbf{B} \mathbf{z}_k \quad (14)$$

$$\bar{\boldsymbol{\psi}}_k = \mathbf{B} \boldsymbol{\psi}_k \quad (15)$$

步骤4 计算优化约束边界。用步骤3中得到的辅助数据基矩阵 $\bar{\psi}_k$ 对辅助待检测单元数据 $\bar{z}_k$ 进行最小二乘拟合：

$$\bar{\alpha}_k^* = \arg \min_{\bar{\alpha}_k} \|\bar{z}_k - \bar{\psi}_k \bar{\alpha}_k\|_2 \quad (16)$$

其中 $\|\cdot\|_2$ 表示向量的2-范数， $\bar{\alpha}_k$ 为数据 $\bar{z}_k$ 在基矩阵 $\bar{\psi}_k$ 上的拟合系数。用最优的拟合系数 $\bar{\alpha}_k^*$ 的2-范数作为后续步骤中数据拟合的优化约束边界，即

$$\eta_k = \|\bar{\alpha}_k^*\|_2 \quad (17)$$

步骤5 对待检测单元数据进行数据拟合。

在步骤4计算得到的边界约束下，用步骤2构造的数据基矩阵对待检测单元数据进行最小二乘拟合：

$$y_k = \min_{\alpha_k} \|\mathbf{z}_k - \psi_k \alpha_k\|_2, \quad \text{s.t.} \quad \|\alpha_k\|_2 \leq \eta_k \quad (18)$$

其中 $\alpha_k$ 为数据 $\mathbf{z}_k$ 在基矩阵 $\psi_k$ 上的拟合系数， $y_k$ 表示最优拟合表示后的拟合误差。

用步骤2的构造方式，数据基矩阵 $\psi_k$ 可以对所有 $3N \times 1$ 维的复矢量进行完全拟合表示。当待检测单元中存在目标信号时，也能够被完全拟合。同时，由于数据基矩阵中主要是强杂波和干扰分量，需要拟合表示的目标信号将落在次干扰空间，即对目标信号进行拟合的主要是数据基矩阵中的噪声分量，这样在所构造的数据基矩阵上就需要有较大的表示系数。而辅助数据中主要是杂波与干扰分量(本文假设干扰信号来自于天线旁瓣)，不包含目标信号，在由其充分拟合后得到的拟合系数的约束下，可以使得待处理数据经过式(18)的数据拟合后其中的目标信号能够得以保留，而杂波分量与可能存在的密集欺骗式干扰将会被完全拟合。当待检测单元中存在目标信号时，拟合误差 $y_k$ 中就会有大的输出。

本算法中所涉及的最小二乘拟合问题，如式(16)和式(18)，均为凸优化问题，可直接采用优化软件工具CVX<sup>[17]</sup>求解。

步骤6 对拟合误差输出进行常规的CA-CFAR检测，输出对运动目标的检测结果。

本文所提算法的处理流程如图2所示。

## 4 实验结果与分析

本节中采用美国空军研究实验室(AFRL)主导

的多通道机载雷达测量(Multi-Channel Airborne Radar Measurements, MCARM)项目<sup>[18]</sup>所录取的实测数据对本文所提算法进行验证。MCARM项目利用一部L波段多通道正侧视阵雷达采集杂波回波数据，以验证STAP技术的杂波抑制性能。此外，为了验证阵列误差对雷达系统性能的影响，数据库中还记录了129个实测的空域导向矢量。本实验选取第5次飞行、第575批雷达数据，雷达波束指向正侧视方向，对应于第65个实测导向矢量。该数据共有22个空域通道，128个相参脉冲，630个距离门采样数据。由于前150个距离门数据中存在发射泄露，本文实验仅对其中第150号到第630号距离门数据进行处理。图3示出了常规脉冲多普勒处理结果。

在验证本文算法处理性能之前，这里首先对算法中涉及的两个重要参数进行实验确定，一个是数据拟合的约束边界，一个是构造数据基矩阵所需要的样本数，它们的准确性对算法性能及运算量有着至关重要的影响。本实验选取第66~95号多普勒通道、第351~450号距离门的待处理单元做3000次蒙特卡洛实验，虚警概率设置为0.01，目标功率为-75 dB。图4给出了在上述实验条件下的检测概率随边界补偿量及样本数的变化关系曲线。图4(a)给出的是边界补偿量对算法检测性能的影响，此处边界补偿量是指对式(17)计算所得的优化边界进行补偿，即 $\delta = \eta_k - \|\bar{\alpha}_k^*\|_2$ 。从图中可以看出，检测概率曲线基本在零补偿量处到达最大值，这就说明本文所提算法中对优化边界的自适应计算是合理且最优的。图4(b)给出了样本数对算法检测性能的影响，不难发现检测概率在样本数为200左右时达到最优。MCARM空时数据维数为2816(22×128)，经过算法步骤1的EFA降维处理后数据维数变为66(22×3)，也就是说本文算法需要大概3倍数据维数的样本即可取得最优的检测性能。这一结论也与传统STAP的样本数要求一致，即要获得满意的STAP性能，需要2~5倍数据维数的独立样本来估计协方差矩阵<sup>[14]</sup>。

在上述实验确定的最优参数下，下面考察本文算法对密集欺骗式干扰的抑制及动目标检测性能。实验中注入5个目标信号，其空域信号流型由第65

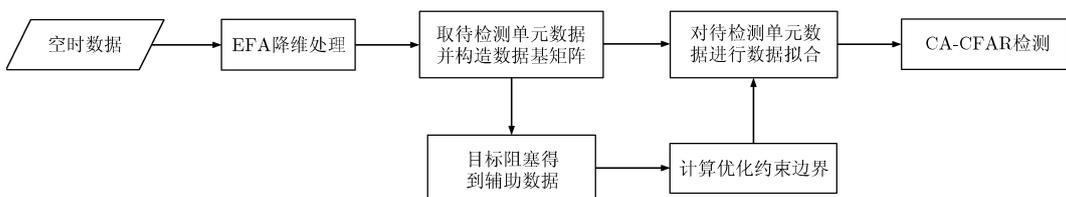


图2 本文算法处理流程图

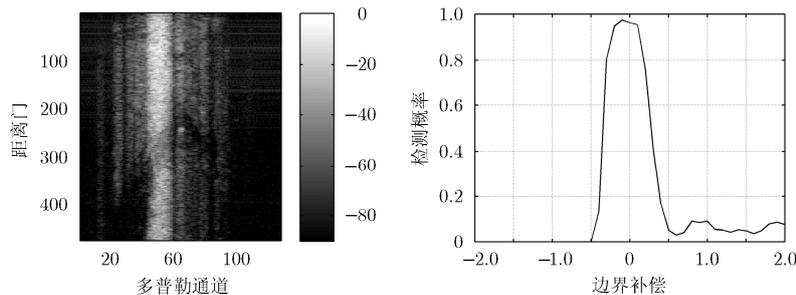


图3 常规脉冲多普勒处理结果

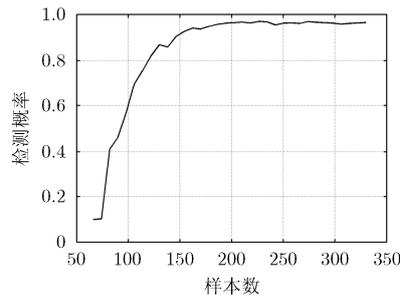


图4 本文算法中边界补偿量与样本数的确定实验

个实测导向矢量给出, 信号功率均设置为  $-20$  dB; 另外假设存在 3 部干扰机, 每部干扰机转发 3 个欺骗式干扰信号, 其空域信号流型分别由第 20, 40 和 80 个实测导向矢量给出, 信号功率均设置为  $0$  dB。这些目标和欺骗式干扰信号在距离-多普勒平面的分布如图 5(a)所示, 其中  $\circ$  表示目标位置,  $\times$  表示欺骗式干扰位置。图 5(b)给出了常规脉冲多普勒处理结果, 可以发现所注入的信号有的落入杂波区, 有的落入噪声区。图 5(c)给出了传统 STAP 算法的检测结果, 此处 STAP 方法用的是 EFA 级联 CA-CFAR 处理。从图中可以看出, 传统 STAP 方法无法有效抑制欺骗式干扰, 使得检测结果中出现了大量由这些干扰所引起的虚警。同时, 对于第 20 号多普勒通道的第 100 号距离门附近及第 40 号多普勒通道的第 400 号距离门附近的目标来说, 由于其 CFAR 检测器的背景单元中存在较强的干扰输出,

抬高了 CFAR 检测门限, 导致无法对这两个真实目标进行可靠检测。图 5(d)给出的是本文算法的检测结果。从图中可以看出, 所有欺骗式干扰都得到了有效抑制, 并且能够很好地检测出真实目标。

在实际的雷达工作场景中, 干扰机经过信号延时和调制, 往往会同时产生大量欺骗式干扰, 在雷达接收回波的距离维上形成密集分布的虚假目标, 即在某个或某几个方向上所有距离门都会存在这种欺骗式干扰信号。下面检查本文算法对这种密集欺骗式干扰的抑制性能。仿真实验中假设存在两部干扰机, 产生的干扰信号均在第 85 号到第 215 号距离门上连续存在, 其空域信号流型分别对应第 20 个和第 80 个实测导向矢量。第 1 部干扰机所产生的欺骗式假目标都位于第 10 号多普勒通道, 第 2 部干扰机所产生的第 85 号到第 215 号距离门上的假目标信号的多普勒通道依次为  $[12 \cdots 128 \ 12 \ 3]$ 。另外, 在第 10

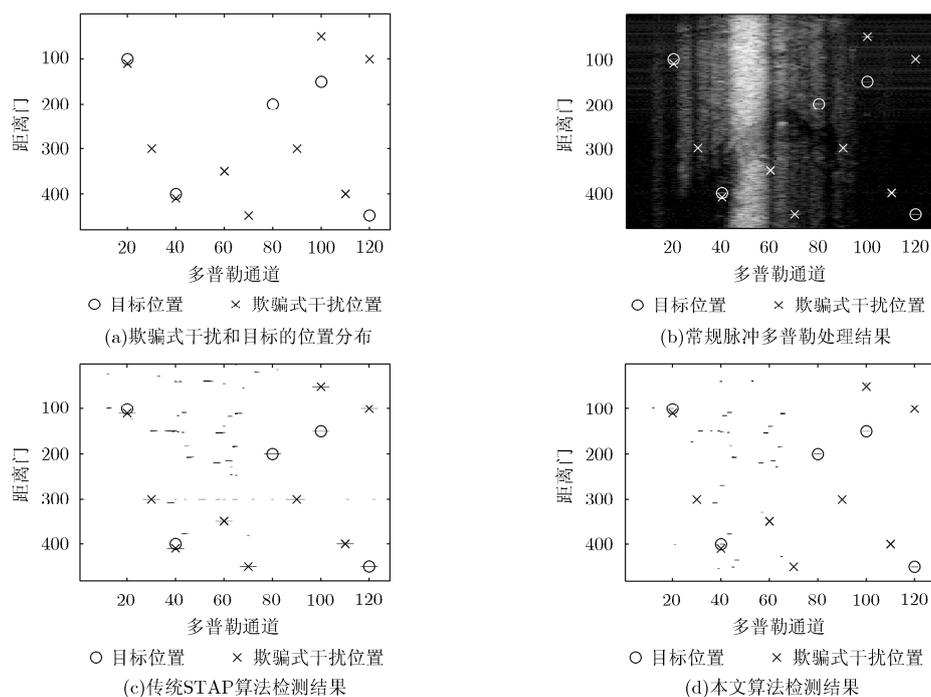


图5 本文算法与传统 STAP 算法检测结果比较

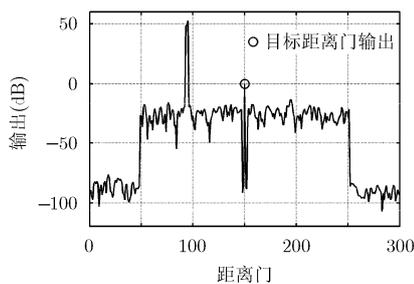
号多普勒通道、第 150 号距离门单元注入了一个真实目标，其空域信号流型对应第 65 个实测导向矢量。这样，与真实目标信号落在同一个距离门的欺骗式干扰有两个，对应的空域导向矢量号和多普勒通道号分别为 20, 10 和 80, 66。干扰和目标的信号功率都设置为 0 dB。图 6 给出了经传统 STAP 算法和本文算法处理后第 10 号多普勒通道部分距离门的滤波输出结果。由于本文算法和此处所采用的 EFA 算法都是多普勒局域化后的自适应处理方法，因此相同距离门不同多普勒通道的欺骗式干扰，如第 2 部干扰机所产生的干扰信号，不会对目标所在距离多普勒单元的滤波造成影响。第 1 部干扰机信号在目标多普勒通道连续距离门上连续存在，因此传统自适应算法能够获得足够的干扰统计信息，从而对该干扰进行了很好抑制，如图 6(a)所示。而第 2 部干扰机产生的第 10 号多普勒通道上的干扰信号位于第 94 号距离门，EFA 算法因为无法获得足够的干扰样本而不能对其进行有效抑制。图 6(b)的仿真结果表明本文算法能够对上述的密集欺骗式干扰进行有效可靠地抑制。

密集欺骗式干扰不仅包括少量干扰机转发大量欺骗式假目标情形，也包括存在大量干扰源的情况。下面考察当存在多部干扰机时本文算法与传统 STAP 算法的滤波效果。假设在第 10 号多普勒通道存在 26 个欺骗式干扰信号和 1 个目标信号，其空域

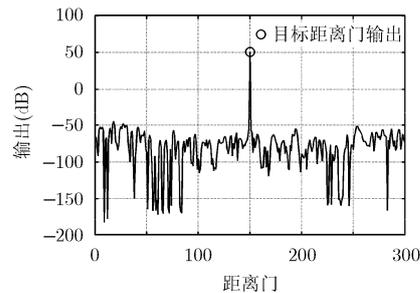
信号流型分别对应第 [10 : 4 : 58 65 72 : 4 : 120] 个实测导向矢量(即雷达场景中存在 26 部干扰机)，它们分别位于第 [85 : 5 : 145 150 155 : 5 : 215] 号距离门，中间位置处为目标信号。干扰和目标的信号功率都设置为 0 dB。从图 7(a)可以看出，经传统 STAP 算法处理后欺骗式干扰仍会有较强的剩余功率输出，导致大量虚假目标，并且会抬高 CFAR 检测器的背景单元电平，使得强目标信号也有可能湮没其中而无法检测；而本文算法可以很好地抑制这 26 个干扰源所转发的欺骗式干扰信号，如图 7(b)所示，目标距离门处的滤波输出超过其他距离门(包括干扰距离门)约 90 dB。从该实验可以看出，本文算法对密集干扰源所转发的欺骗式干扰也有很好的抑制效果。

### 5 结束语

针对机载雷达密集欺骗式干扰的抑制问题，本文提出一种基于数据拟合的动目标检测方法。该方法无需对欺骗式干扰机的方位进行探测和估计，相比其他同类干扰抑制算法大大减少了系统复杂度，易于实现；与降维 STAP 方法的结合，大大减少了算法运算量及其对样本数据的需求；能够充分抑制密集干扰源转发的密集欺骗式干扰信号，减少由其引起的虚警，消除其对 CFAR 检测门限的不利影响，改善了机载雷达的动目标检测性能。基于实测数据的实验结果验证了本文算法的有效性。

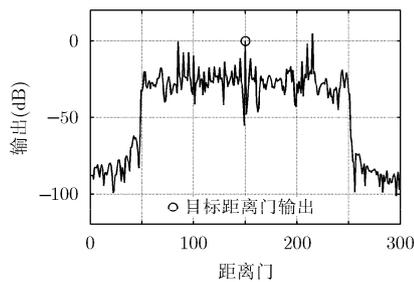


(a)传统STAP算法滤波输出

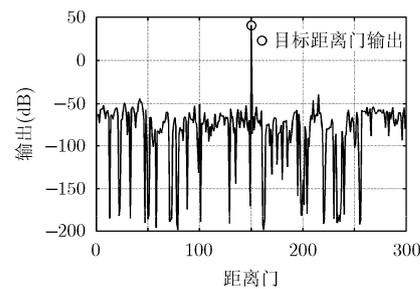


(b)本文算法滤波输出

图 6 本文算法与传统 STAP 算法在第 10 号多普勒通道的滤波结果比较



(a)传统STAP算法滤波输出



(b)本文算法滤波输出

图 7 本文算法与传统 STAP 算法在第 10 号多普勒通道的滤波结果比较

## 参考文献

- [1] 杨建宇. 雷达技术发展规律和宏观趋势分析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 19-27.  
Yang Jian-yu. Development laws and macro trends analysis of radar technology[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 19-27.
- [2] 贲德, 王峰, 雷志勇. 基于认知原理的机载雷达抗干扰技术研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2013, 8(4): 368-372.  
Ben De, Wang Feng, and Lei Zhi-yong. Key anti-jamming technique of airborne radar based on cognition[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2013, 8(4): 368-372.
- [3] Xiong Ying, Gu Hai-yan, Tang Bin, *et al.* An investigation of range-velocity deception jamming modeling[C]. Proceedings of the International Conference on Advanced Computer Science and Electronics Information, Hangzhou, China, 2013: 59-63.
- [4] 郭俊杰, 王兴华, 王星, 等. 雷达信号频率调制的灵巧噪声干扰技术[J]. 西安电子科技大学学报, 2013, 40(4): 155-160.  
Guo Jun-jie, Wang Xing-hua, Wang Xing, *et al.* New smart noise jamming of radar signal frequency modulation[J]. *Journal of Xidian University*, 2013, 40(4): 155-160.
- [5] 刘永才, 王伟, 潘小义, 等. 基于延迟-移频的 SAR 有源欺骗干扰有效区域研究[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 46-53.  
Liu Yong-cai, Wang Wei, Pan Xiao-yi, *et al.* Effective region of active decoy jamming to SAR based on time-delay Doppler-shift method[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(1): 46-53.
- [6] 周颖, 施龙飞, 陈明辉, 等. 密集干扰环境下相控阵雷达资源管理优化研究[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 999-1003.  
Zhou Ying, Shi Long-fei, Chen Ming-hui, *et al.* Optimized resource management for phased array radar in dense jamming[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(6): 999-1003.
- [7] Sen S. OFDM radar space-time adaptive processing by exploiting spatio-temporal sparsity[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(1): 118-130.
- [8] Yang Xiao-peng, Liu Yong-xu, and Long Teng. Robust non-homogeneity detection algorithm based on prolate spheroidal wave functions for space-time adaptive processing[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2013, 7(1): 47-54.
- [9] Zhang Jin-dong, Zhu Dai-yin, and Zhang Gong. New antivelocitv deception jamming technique using pulses with adaptive initial phases[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(2): 1290-1300.
- [10] 姚辉伟, 魏玺章, 秦玉亮, 等. 轨道根数时不变特性有源假目标识别[J]. 电子学报, 2012, 40(8): 1558-1563.  
Yao Hui-wei, Wei Xi-zhang, Qin Yu-liang, *et al.* Identification of ballistic active decoys based on time invariant of orbital elements[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(8): 1558-1563.
- [11] Tian Xiao and Tang Bin. Spectrum texture features based radar deception jamming recognition using joint frequency-slow time processing[J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2013, 9(13): 5181-5188.
- [12] 罗双才, 唐斌. 一种基于盲分离的欺骗干扰抑制算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12): 2801-2806.  
Luo Shuang-cai and Tang Bin. An algorithm of deception jamming suppression based on blind signal separation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(12): 2801-2806.
- [13] Dipietro R. Extended factored space-time processing for airborne radar system[C]. Proceedings of the 26th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computing, Pacific Grove, California, USA, 1992: 425-430.
- [14] Ward J. Space-time adaptive processing for airborne radar[R]. Lincoln Laboratory MIT, 1994.
- [15] Melvin W L. Space-time adaptive radar performance in heterogeneous clutter[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(2): 621-633.
- [16] Goldstein J S and Reed I S. Theory of partially adaptive radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, 33(4): 1309-1325.
- [17] Grant M and Boyd S. CVX: Matlab software for disciplined convex programming[OL]. <http://www.stanford.edu/~boyd/cvx>, 2013.5.
- [18] Sloper D, Fenner D, Arntz J, *et al.* Multi-channel airborne radar measurement (MCARM), MCARM flight test[R]. MIT Lincoln Lab., Lexington, MA, 1996.
- 同亚龙: 男, 1987 年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理、空时自适应信号处理以及地面运动目标检测。
- 王 彤: 男, 1974 年生, 教授, 研究方向为机载雷达运动目标检测、合成孔径雷达成像等。
- 代保全: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理、空时自适应信号处理。
- 吴建新: 男, 1982 年生, 副教授, 研究方向为空时自适应信号处理、雷达成像及动目标检测等。