

基于信号-数据联合处理的压制-距离欺骗复合干扰抑制算法

王国宏 白杰* 孙殿星 张翔宇

(海军航空大学信息融合研究所 烟台 264001)

摘要: 针对单一信号处理或数据处理对压制-欺骗加性复合干扰抑制效果较差的问题, 论文提出一种适用于脉冲压缩雷达的基于信号-数据联合处理的压制-距离欺骗复合干扰抑制算法。首先, 通过分数阶傅里叶变换(FRFT)域窄带滤波以及LFM信号重构对消算法, 实现信号层对压制干扰的抑制, 并减小对真实目标的漏检概率; 然后, 利用噪声点迹空间相关性较差的特征, 通过M/N逻辑法对噪声点迹进行剔除, 并对目标点迹进行航迹起始; 最后, 根据距离假目标航迹角度量测误差方差较大的特点, 通过 χ^2 检验以及聚类划分算法, 对虚假目标航迹进行剔除, 最终实现对压制-欺骗加性复合干扰的抑制。仿真结果表明, 该文算法对压制-欺骗复合干扰能够起到较好的抑制效果。

关键词: 信号-数据联合处理; 压制-距离欺骗复合干扰; 分步抑制; 分数阶傅里叶变换

中图分类号: TN972

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)10-2430-08

DOI: 10.11999/JEIT170759

A Suppression Algorithm of Blanket-distance Deception Compound Jamming based on Joint Signal-data Processing

WANG Guohong BAI Jie SUN Dianxing ZHANG Xiangyu

(Institute of Information Fusion, Naval Aeronautics University, Yantai 264001, China)

Abstract: Considering at the problem that the suppression effect of single signal processing or data processing is poor on blanket-deception compound jamming, a suppression algorithm of blanket-distance deception compound jamming based on joint signal-data processing is proposed. Firstly, the Fractional Fourier Transform (FRFT) domain narrowband filtering and LFM signal reconstruction algorithm are used to suppress the suppression of the signal layer and reduce the leakage probability of the real target. Then, the target tracks and the deception tracks are rejected by using the M/N logic method. Finally, according to the different characteristics of the angle variance between the false targets and the true targets, the false targets are eliminated by the χ^2 test and the clustering algorithm. The simulation results verify the good effect of the algorithm proposed in this paper.

Key words: Joint signal-data processing; Blanket-distance deception compound jamming; Step-by-step suppression; Fractional Fourier Transform (FRFT)

1 引言

近年来, 随着雷达干扰技术的发展, 有源复合干扰以其功率高、欺骗性强的特点, 逐步在有源干扰领域获得不断发展。复合干扰是指对抗威胁目标时, 同时或者顺序使用两种及两种以上的干扰手段或干扰样式^[1]。复合干扰可以使压制式干扰与欺骗

式干扰协同工作, 从而给雷达带来极大的威胁。所以, 对有源复合干扰的对抗是抗干扰领域急需解决的关键问题。

目前, 由于国内外关于有源复合干扰对抗的文献相对较少, 但仍有一些研究值得参考。文献[2,3]通过在前后脉冲附加正交扰动相位, 并结合匹配滤波算法实现干扰抑制; 文献[4]提出利用Kohonen神经网络进行特征提取来实现雷达抗复合干扰的新方法; 文献[5,6]是针对雷达抗距离-速度欺骗复合干扰的研究, 其中, 文献[5]提出了基于雷达组网的低可观测目标跟踪方法; 文献[6]通过目标信号谱峰检测和距离波门控制来对抗距离-速度同步拖引干扰; 文献[7]提出了采用检测门限自适应与卡

收稿日期: 2017-07-26; 改回日期: 2018-06-29; 网络出版: 2018-07-30

*通信作者: 白杰 1541753296@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61731023, 61701519, 61501489); 泰山学者攀登计划

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61731023, 61701519, 61501489), Taishan Scholar Climbing Plan

方检验相结合的方法实现对距离波门拖引的鉴别,同时,采用多假设跟踪实现了远距离支援干扰与距离波门拖引干扰复合干扰下的目标跟踪;文献[8]通过对消方法抑制压制干扰成分后利用差拍、滤波的方法对距离假目标干扰进行处理。通过上述文献可以看出,目前对复合干扰的对抗主要从单纯的信号层或者数据层进行,但是,对于兼具压制效果与欺骗效果的复合干扰而言,单纯的信号处理并不能够对高逼真度的虚假目标进行剔除,而单纯的数据处理在压制干扰较强时很难应用。

针对这个问题,本文充分考虑压制干扰与欺骗干扰的信号特征差异,综合利用信号层处理以及数据层处理的优势,提出了一种基于信号-数据联合处理的压制-距离欺骗复合干扰抑制算法。

2 问题分析与算法流程

考虑到噪声调频干扰以及距离多假目标干扰分别为目前应用最广泛的压制干扰样式以及欺骗干扰样式,所以本文针对噪声调频干扰与距离多假目标干扰的加性复合干扰进行研究。设雷达发射的是LFM信号,假设在一定观测时间内目标的运动速度不变,则在噪声调频干扰与距离多假目标干扰的复合干扰情况下,雷达接收到的回波信号为

$$x(t) = s_r(t) + J_1(t) + J_2(t) + n(t) \quad (1)$$

其中, $s_r(t)$ 为真实目标回波信号,其时域表达式为

$$s_r(t) = a_0 \exp[-j2\pi((f_0 + f_d)(t + t_0) + \mu(t + t_0)^2/2 + \phi_s)] \quad (2)$$

其中, a_0 , f_0 , f_d 和 ϕ_s 分别表示目标回波信号的幅度、载频、多普勒频率以及初始相位, μ 表示LFM信号的调制斜率, t_0 表示目标与雷达之间距离所对应的时延。 $J_1(t)$ 为噪声调频干扰信号,其时域表达式为

$$\begin{aligned} J_1(t) &= U_j \cos \left[\omega_j t + K_{FM} \int_0^t u(t') dt' + \varphi \right] \\ &= U_j \cos [\omega_j t + \phi(t) + \varphi] \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $u(t)$ 与 $\phi(t)$ 分别对应噪声调频干扰信号的瞬时频率及瞬时相位, φ 为 $(0, 2\pi]$ 均匀分布, 且与 $u(t)$ 和 $\phi(t)$ 相互独立, U_j , ω_j 和 K_{FM} 为噪声调频信号的幅度、中心频率和调频斜率, 定义 $m_{fe} = K_{FM} \times \sigma / \Omega_n$ 为有效调频指数, σ 为调制噪声标准差, Ω_n 为调制噪声带宽。 $J_2(t)$ 为距离多假目标干扰, 在式

(2)的基础上可得到其时域表达式为

$$J_2(t) = \sum_{i=1}^M a_i \exp[-j(2\pi f_0(t + t_0 + \tau_i) + \mu(t + t_0 + \tau_i)^2 + \phi)] \quad (4)$$

其中, M 表示距离假目标个数, a_i 表示第 i 个假目标信号的幅度, t_0 表示目标与雷达之间距离所对应的时延, τ_i 表示第 i 个假目标所附加的欺骗干扰时延。 $n(t)$ 表示过程噪声, 为高斯白噪声。

通过以上模型可以看出, 压制干扰与目标回波信号特征差异较大, 所以可以利用信号层处理对压制干扰进行抑制; 同时, 欺骗干扰与真实目标的信号特征相似, 在信号层很难对高逼真度的假目标进行剔除, 所以需要依靠数据层处理对欺骗干扰进行抑制。基于以上分析, 本文对加性复合干扰的分步抑制流程如图1所示。

3 加性有源复合干扰分步抑制算法

由于本文所采用的雷达信号形式为LFM信号, 所以拟首先在分数阶傅里叶变换(FRFT)域根据LFM信号的能量聚集特性进行窄带滤波以实现压制干扰抑制, 在空间域形成点迹之后, 利用M/N逻辑法以及虚假航迹鉴别算法实现对噪声点迹以及虚假航迹的剔除, 从而实现对加性有源复合干扰的抑制。

3.1 噪声调频干扰抑制算法

3.1.1 LFM信号检测 在对LFM信号在FRFT域进行窄带滤波之前, 为保证算法的有效性, 首先进行LFM信号的检测。由文献[9]可得, 当FRFT变换阶次 p 与LFM信号的调频率 μ 正交, 即

$$p_z = \frac{-2\text{arc cot}(2\pi\mu)}{\pi} + 2 \quad (5)$$

时, LFM信号在 u 域表示为冲激函数, 具有明显的能量聚集特性, 并称 p_z 为LFM信号最佳变换阶次, 而噪声调频信号在FRFT域只具有局部能量较弱聚集的特性。LFM信号与噪声调频干扰的FRFT域能量聚集特性差异导致了两者的峰值分布差异。图2表示不同参数条件下LFM信号在FRFT域的峰值所在变换阶次情况, 图3(a)和图3(b)分别表示有效调频指数取1.0和5.3时噪声调频干扰在FRFT域的峰值所在变换阶次情况。

通过图2和图3的对比可以看出, LFM信号在



图1 本文算法流程图

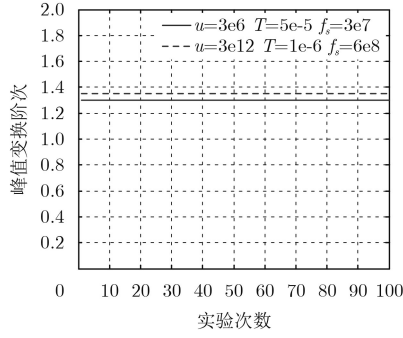


图2 LFM信号峰值阶次

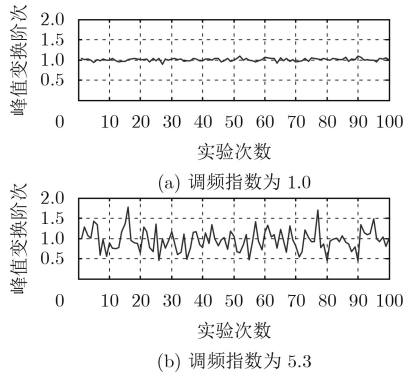


图3 噪声调频干扰峰值阶次

FRFT域的峰值点稳定出现在最佳变换阶次，而噪声调频干扰在FRFT域的峰值随机分布在一定变换阶次范围内，两者差异较为明显。据此提出LFM信号的双门限检测算法：当多个时段的回波信号中，FRFT域峰值点出现在LFM信号最佳变换阶次邻域 $\delta(p_z)$ 内的个数大于一定门限值时，判断LFM信号存在。

根据式(5)得到LFM信号的最佳变换阶次 p_z ，对区间 $\delta(p_z)$ 的选取需要考虑调制斜率 μ 的估计误差以及由变换阶次步长 Δp 带来的舍入误差：根据调制斜率 μ 的估计误差，得到以 p_z 为中心的误差区间为 $(p_z - \sigma_{p_z}, p_z + \sigma_{p_z})$ ，向两边扩展误差区间，使区间的左边界取小于 $p_z - \sigma_{p_z}$ 的最大变换阶次 p_m ，区间的右边界取大于 $p_z + \sigma_{p_z}$ 的最小变换阶次 p_n ，分别以 p_m 和 p_n 为左右边界构成区间 $\delta(p_z)$ 。将一定观测时间内的回波信号分成 N 段，通过峰值搜索算法得到各段信号在FRFT域的峰值阶次分别为 p_j ($j = 1, 2, \dots, N$)，若 p_j 中，取值落在 $\delta(p_z)$ 区间内的个数 D 大于门限值 T ，则判断LFM信号存在，否则判断LFM信号不存在。借鉴文献[10]中得到最优2级门限取值：2级阈值检测的最优值可以通过评价在适当假设下的每个可能门限值的相对检测效率而得到。LFM信号双门限检测算法流程如图4所示。

3.1.2 基于窄带滤波的干扰消除 在检测到LFM信

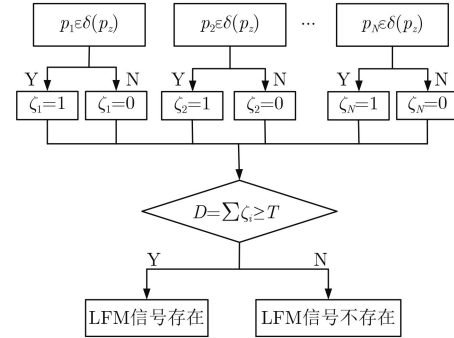


图4 LFM信号双门限检测算法

号存在后，构建窄带滤波器进行干扰消除。由于欺骗干扰的存在，回波信号中存在多个LFM信号，所以本文采取以下步骤实现对LFM信号的逐个窄带滤波：

- (1)在检测到LFM信号存在后，利用拟Newton法进行峰值迭代搜索，以得到峰值点坐标；
- (2)根据峰值坐标构建滤波器进行窄带滤波，对滤波输出进行FRFT逆变换等处理形成点迹；
- (3)根据峰值坐标，对检测到的LFM信号进行重构对消，以对其他LFM信号分量进行检测；
- (4)重复上述步骤，直到检测不到LFM信号的存在。以下对上述步骤进行详细说明。

步骤(1)中的迭代算法可以表示为

$$\begin{bmatrix} \tilde{\alpha}_{n+1} \\ \tilde{u}_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\alpha}_n \\ \tilde{u}_n \end{bmatrix} - \lambda_n \mathbf{H}_n \begin{bmatrix} \frac{\partial |X_\alpha(u)|^2}{\partial p} \\ \frac{\partial |X_\alpha(u)|^2}{\partial u} \end{bmatrix} \bigg|_{\substack{\alpha=\tilde{\alpha}_n \\ u=\tilde{u}_n}} \quad (6)$$

其中， $\tilde{\alpha}_n$ 和 $\tilde{u}_n$ 为第 n 次搜索的结果， λ_n 为第 n 次搜索的步长系数， $\mathbf{H}_n$ 为函数 $|X_\alpha(u)|^2$ 在 $(\tilde{\alpha}_n, \tilde{u}_n)$ 点的尺度矩阵，可通过迭代算法求得。依次进行迭代过程，直到 α_n 的取值满足所要求的精度，并得到最终的峰值点坐标为 $\{\tilde{\alpha}_0, \tilde{u}_0\}$ 。坐标 $\{\tilde{\alpha}_0, \tilde{u}_0\}$ 满足：

$$\{\tilde{\alpha}_0, \tilde{u}_0\} = \arg \max |X_\alpha(u)|^2 \quad (7)$$

对步骤(2)中的窄带滤波器参数进行设置：取旋转角度 $\alpha = \tilde{\alpha}_0$ 的FRFT结果进行窄带滤波，将窄带滤波器的滤波中心设置为 $\tilde{u}_0$ ，并根据“完整保留目标能量的前提下尽可能窄”的原则对滤波带宽进行设置。结合文献[11]的结论：为保证LFM信号不丢失，FRFT域窄带滤波的宽度必须不小于主瓣宽度 $2/B$ ，其中 B 为LFM信号带宽。取滤波器带宽 L 为

$$L = B/2 + \sigma_L \quad (8)$$

其中， σ_L 表示由于式(7)的估计误差所导致的主瓣宽度展宽量。在对LFM信号进行窄带滤波之后，对滤波器的输出进行FRFT逆变换，经脉冲压缩和

恒虚警检测等处理形成点迹。

对于式(2)给出的信号模型，步骤(3)中的LFM信号参数估计过程可以描述为^[12,13]

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\mu} &= -\cot \tilde{\alpha}_0, \tilde{f} = \tilde{u}_0 \csc \tilde{\alpha}_0 \\ \tilde{\phi} &= \arg \left[\frac{X_{\tilde{\alpha}_0}(\tilde{u}_0)}{A_{\tilde{\alpha}_0} \exp(j\pi \tilde{u}_0^2 \cot \tilde{\alpha}_0)} \right] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

根据所估计的参数，按照式(2)的形式进行信号重构。由于重构的LFM信号与被估计的LFM信号在FRFT域是重合的，所以在FRFT域对检测到的LFM信号进行对消。

通过上述4个步骤，回波信号中的所有LFM信号分量被逐个检测出来，并在空间域形成点迹，但是由于所形成的点迹中包含真实目标点迹、虚假目标点迹以及噪声点迹，所以需要在数据层对点迹进行进一步处理，以实现噪声点迹以及虚假航迹的剔除。

3.2 基于M/N逻辑起始的噪声点迹剔除

经过信号层处理，大部分的压制干扰和噪声能量被剔除，所以在空间域所形成的点迹密度较小，为保证真实目标点迹能够以较大概率起始成功，根据噪声点迹空间相关性较弱的特点，采用3/4逻辑法对噪声点迹进行消除，并对符合逻辑要求的航迹进行起始。

设恒虚警检测得到的信号尖峰出现在时延为 τ 的位置，此时测得目标的俯仰角为 θ ，方位角为 ϕ ，雷达测距误差方差为 σ_ρ^2 ，俯仰角误差方差为 σ_θ^2 ，方位角误差方差为 σ_ϕ^2 ，根据坐标转换公式可以得到目标的空间坐标为

$$x = \frac{c\tau}{2} \cos \theta \cos \phi, y = \frac{c\tau}{2} \cos \theta \sin \phi, z = \frac{c\tau}{2} \sin \theta \quad (10)$$

量测协方差矩阵 $\mathbf{R}$ 表示为^[14]

$$\mathbf{R} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \sigma_\rho^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\phi^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\theta^2 \end{bmatrix} \mathbf{A}' \quad (11)$$

其中，

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & -\rho \sin \phi \cos \theta & -\rho \cos \phi \sin \theta \\ \sin \phi \cos \theta & \rho \cos \phi \cos \theta & -\rho \sin \phi \sin \theta \\ \sin \theta & 0 & \rho \cos \theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

设 $\mathbf{Z}_i^l = [x^l(i), y^l(i), z^l(i)]$ 为第 i 次扫描量测的第 l 个分量， $\mathbf{R}_i^l$ 为其对应的协方差。

(1)以暂时航迹的第1个点 $p_{1[x(1),y(1),z(1)]}$ 为球心构建球环形区域。如果下一个周期雷达在此区域内

观测到新的点迹，则暂时航迹形成第2个点 $p_{2[x(2),y(2),z(2)]}$ ，否则删除该暂时航迹。

$$\begin{aligned} v_{\min} t &\leq \sqrt{[x(2) - x(1)]^2 + [y(2) - y(1)]^2 + [z(2) - z(1)]^2} \\ &\leq v_{\min} t \end{aligned} \quad (13)$$

式中， $v_{\max}$ ， $v_{\min}$ 分别为目标运动的最大速度和最小速度； t 为雷达的扫描周期。

(2)在获得 $p_{1[x(1),y(1),z(1)]}$ ， $p_{2[x(2),y(2),z(2)]}$ 点后，按式(14)进行直线外推，以得到点 $\hat{p}_{3[\hat{x}(3),\hat{y}(3),\hat{z}(3)]}$ 。

$$\hat{\mathbf{Z}}_3 = 2\mathbf{Z}_2 - \mathbf{Z}_1, \hat{\mathbf{R}}_3 = 4\mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_1 \quad (14)$$

式中， $\hat{\mathbf{Z}}_3 = [\hat{x}(3), \hat{y}(3), \hat{z}(3)]$ ； $\hat{\mathbf{R}}_3$ 是其对应的协方差。

(3)在获得外推点 $\hat{p}_{3[\hat{x}(3),\hat{y}(3),\hat{z}(3)]}$ 后，以 $\hat{p}_{3[\hat{x}(3),\hat{y}(3),\hat{z}(3)]}$ 为中心，由式(15)确定关联区域2。

$$D_3 = \mathbf{d}_3^T [\mathbf{R}_3 + \hat{\mathbf{R}}_3]^{-1} \mathbf{d}_3 \quad (15)$$

其中， $\mathbf{d}_3 = \mathbf{Z}_3 - \mathbf{Z}'_3$ ， $\mathbf{d}_3^T$ 为 $\mathbf{d}_3$ 的转置。这里 D_3 服从自由度为 p 的 χ^2 分布。若第3次扫描量测所得的最小 $D_{3\min}$ 值小于 γ ，则对该量测点 $p_{3[x(3),y(3),z(3)]}$ 给予互联，并判定航迹起始成功。

(4)若关联区域2中不存在满足(3)的量测点 $p_{3[x(3),y(3),z(3)]}$ ，则以 $\hat{p}_{3[\hat{x}(3),\hat{y}(3),\hat{z}(3)]}$ 为中心继续进行外推，并按照和(3)相同的规则寻找量测点 $p_{4[x(4),y(4),z(4)]}$ 。若存在满足要求的 $p_{4[x(4),y(4),z(4)]}$ ，则判定航迹起始成功；否则判定航迹起始失败。

由于噪声点迹随机性较大，通过3/4逻辑法能够对噪声点迹进行较好的剔除。但是，距离假目标的运动状态与真实目标相似，所以需要通过虚假航迹鉴别实现虚假目标航迹剔除。

3.3 基于虚假航迹鉴别的欺骗干扰抑制

距离多假目标干扰是对雷达威胁较大且应用较为广泛的一种欺骗干扰类型^[15]。距离多假目标欺骗干扰能够使真实目标、虚假目标、雷达近似处于同一直线上，并且通常情况下真-假目标之间的距离保持不变，易形成与真实目标相似的虚假航迹，迷惑性较强。针对这一空间位置特征，本文采用角度信息 χ^2 检验的方法对距离假目标的存在性进行判断，并采用聚类划分的方法对真-假目标进行识别，以对虚假目标进行剔除。

3.3.1 基于角度量测 χ^2 检验的干扰检测方法 在欺骗干扰抑制之前首先进行欺骗干扰的存在性检测，针对距离多假目标形成稳定航迹的情况，根据距离多假目标干扰的空间分布特征，采用角度量测 χ^2 检验^[16]的方法对欺骗干扰的存在性进行判定，具体过程如下：

已知在雷达的监视区域内存在若干条稳定的航迹, 设 k 时刻第 i 条航迹上对应的量测为 $(r_k^i, \theta_k^i, \phi_k^i)$, 其中 r_k^i 为距离量测、 θ_k^i 为俯仰角量测、 ϕ_k^i 为方位角量测, 同样设 k 时刻第 j 条航迹上对应的量测为 $(r_k^j, \theta_k^j, \phi_k^j)$ 。采用角度量测 χ^2 检验的方法对其进行判断。

$$\lambda = \frac{(\theta_k^i - \theta_k^j)^2}{2\sigma_\theta^2} + \frac{(\phi_k^i - \phi_k^j)^2}{2\sigma_\phi^2} < F_\alpha \quad (16)$$

其中, λ 为检验统计量, 服从自由度为2的 χ^2 分布, $\sigma_\theta, \sigma_\phi$ 分别为雷达的俯仰角和方位角量测误差标准差, F_α 为判别门限, 可根据显著性水平来确定。如果这两组量测满足式(16), 则初步判定航迹 i 与航迹 j 中至少有一条航迹来自于欺骗干扰。

3.3.2 基于聚类划分的虚假目标识别方法 在检测到欺骗干扰存在后, 进一步对虚假目标航迹进行鉴别, 设 N 个时刻的量测集合表示为

$$\omega_l = \begin{bmatrix} (r_1^1, \theta_1^1, \phi_1^1) & \cdots & (r_i^1, \theta_i^1, \phi_i^1) & \cdots & (r_N^1, \theta_N^1, \phi_N^1) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ (r_1^j, \theta_1^j, \phi_1^j) & \cdots & (r_i^j, \theta_i^j, \phi_i^j) & \cdots & (r_N^j, \theta_N^j, \phi_N^j) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ (r_1^M, \theta_1^M, \phi_1^M) & \cdots & (r_i^M, \theta_i^M, \phi_i^M) & \cdots & (r_N^M, \theta_N^M, \phi_N^M) \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中, $(r_i^j, \theta_i^j, \phi_i^j)$ 是第 j 条航迹中第 i 时刻的量测, r_i^j 为距离量测, θ_i^j 为俯仰角量测, ϕ_i^j 为方位角量测。在相同时刻将 ω_l 中所有航迹的方位角、俯仰角量测两两做差, 可得

$$\Omega_\theta^{jl} = \{(\theta_1^j - \theta_1^l), \dots, (\theta_i^j - \theta_i^l), \dots, (\theta_N^j - \theta_N^l)\} \quad (18)$$

$$\Omega_\phi^{jl} = \{(\phi_1^j - \phi_1^l), \dots, (\phi_i^j - \phi_i^l), \dots, (\phi_N^j - \phi_N^l)\} \quad (19)$$

由于集合 ω_l 中只有一条航迹为真实目标航迹, 其余航迹为虚假目标航迹, 所以 Ω_θ^{jl} 与 Ω_ϕ^{jl} 可以划分为两类: 第1类是由“真实目标航迹”与“虚假目标航迹”的角度量测相减构成; 第2类是由“虚假目标航迹”与“虚假目标航迹”的角度量测相减构成。

当 Ω_θ^{jl} 属于第1类时, 设航迹 j 为真实航迹, 航迹 l 为虚假航迹, 则 θ_i^j 与 θ_i^l 表示为

$$\theta_i^j = \theta_i^t + \Delta\theta, \theta_i^l = \theta_i^t + \Delta\theta_f^l \quad (20)$$

$$\theta_i^j - \theta_i^l = \Delta\theta - \Delta\theta_f^l \sim N(0, \sigma_\theta^2 + \sigma_{\theta_f}^2) \quad (21)$$

其中, θ_i^t 为目标的俯仰角真实值, θ_i^j 为航迹 j 的俯仰角量测, $\Delta\theta$ 为真实目标俯仰角随机量测误差; θ_i^l 为航迹 l 的俯仰角量测, $\Delta\theta_f^l$ 为虚假目标俯仰角随

机量测误差。

当 Ω_θ^{jl} 属于第2类时, 航迹 j 与航迹 l 都为虚假目标航迹, 可得

$$\theta_i^j = \theta_i^t + \Delta\theta_f^j, \theta_i^l = \theta_i^t + \Delta\theta_f^l \quad (22)$$

$$\theta_i^l - \theta_i^j = \Delta\theta_f^l - \Delta\theta_f^j \quad (23)$$

其中, θ_i^j 为航迹 j 的俯仰角量测, θ_i^l 为航迹 l 的俯仰角量测, $\Delta\theta_f^j, \Delta\theta_f^l$ 为虚假目标的俯仰角随机量测误差, 由前文论述可知 $\Delta\theta_f^l, \Delta\theta_f^j$ 独立同分布, 且: $\Delta\theta_f^l \sim N(0, \sigma_{\theta_f}^2), \Delta\theta_f^j \sim N(0, \sigma_{\theta_f}^2)$, 则

$$\theta_i^l - \theta_i^j \sim N(0, 2\sigma_{\theta_f}^2) \quad (24)$$

由式(21)和式(23)可知: 当 Ω_θ^{jl} 属于第2类时 $\theta_i^j - \theta_i^l$ 的方差大于 Ω_θ^{jl} 属于第1类时 $\theta_i^j - \theta_i^l$ 的方差。对于方位角量测可得相同结论。

根据 $\Omega_\theta^{jl}, \Omega_\phi^{jl}$ 属于第1类和第2类时方差的不同, 将所有与集合 $\Omega_\theta^{jl}, \Omega_\phi^{jl}$ 对应的航迹分为方差较大的一类与方差较小的一类, 同时每一类中的 $\theta_i^j - \theta_i^l$ 和 $\phi_i^j - \phi_i^l$ 同分布($1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq l \leq M$)。通常情况下 $\sigma_{\theta_f}^2$ 和 $\sigma_{\phi_f}^2$ 取值无法获得, 但可以对其进行估计。对于已知的具体集合 ω_l , 求集合 $\Omega_\theta^{jl}, \Omega_\phi^{jl}$ 相当于构造出了“总体” $\Delta\theta = \theta_i^j - \theta_i^l$ 与 $\Delta\phi = \phi_i^j - \phi_i^l$ 的容量为 N 的“样本”, 可以利用“样本方差”对“总体方差”进行无偏估计, 过程如下:

$$S_{\Delta\theta}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\theta_i^j - \theta_i^l - \Delta\bar{\theta})^2, \quad \Delta\bar{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\theta_i^j - \theta_i^l) \quad (25)$$

$$S_{\Delta\phi}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\phi_i^j - \phi_i^l - \Delta\bar{\phi})^2, \quad \Delta\bar{\phi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i^j - \phi_i^l) \quad (26)$$

虽然样本容量较小时方差估计的误差较大, 但是仍然可以在一定程度上反映出方差数值的相对大小, 当 Ω_θ^{jl} 与 Ω_ϕ^{jl} 属于不同类时, 点 $(S_{\Delta\theta}^2, S_{\Delta\phi}^2)$ 的分布状态也有所不同, 第1类的分布应当更加靠近第1象限的左下方。

针对这一特点, 本文借鉴聚类的思想^[17,18], 以坐标 $(S_{\Delta\theta}^2, S_{\Delta\phi}^2)$ 为分类特征, 将 Ω_θ^{jl} 与 Ω_ϕ^{jl} 划分为第1类与第2类。理想情况下, 属于第1类的每个 $\Omega_\theta^{jl}, \Omega_\phi^{jl}$ 对应的航迹对都应该包含一个共同的航迹, 这

就是真实目标航迹，而集合 ω_l 中其余航迹则都是由虚假目标形成。在鉴别出虚假航迹之后，在数据层对虚假航迹进行剔除，从而完成对距离假目标干扰的抑制。

4 仿真实验

仿真条件设置：

(1)雷达参数设置：雷达发射的LFM信号调制斜率 $k = 4 \times 10^{10}$ Hz/s，时宽为50 μ s，载频为4 MHz，雷达的测距精度为100 m，方位角、俯仰角测量精度为0.1°，扫描周期为10 s。

(2)干扰信号参数设置：过程噪声采用高斯白噪声，方差 $\sigma_n^2 = 1$ ；噪声调频干扰的调制系数取5000，为了达到有效覆盖目标回波信号的目的，干扰脉宽设置成3倍的发射信号脉宽，干信比为10 dB；为达到较理想的欺骗干扰效果，对欺骗干扰信号的幅度进行调制，使得干扰信号幅度随着与目标间距的增大而变小。

(3)目标参数设置：真实目标平行于 x 轴以340 m/s的速度靠近雷达飞行，初始位置坐标为(150 km, 100 km, 100 km)，距离假目标一共有4个，分布在真实目标的两侧，每侧两个，间隔均为1500 m。

取观测时间为50 μ s，分数阶傅里叶变换阶次取值范围为 $[0, 2\pi]$ ，变换阶次步长为0.001，LFM信号双门限检测算法中，取信号段数为6段。在上述仿真条件下进行100次Monte-Carlo仿真试验，得到不同门限取值下的检测概率和虚警概率如表1所示。

表 1 目标检测概率和虚警概率随门限取值变化

门限取值	1	2	3	4	5	6
检测概率	1.00	1.00	1.00	0.99	0.88	0.79
虚警概率	0.45	0.23	0.11	0.03	0	0

由表1仿真数据，综合考虑检测概率和虚警概率，本文选取双门限检测算法门限值为4。

4.1 噪声调频干扰抑制仿真实验

在复合干扰环境下，回波信号在FRFT域的谱分布情况如图5所示。

由图5可以看出，在复合干扰环境下，真实目标回波信号同时受压制干扰以及欺骗干扰的影响，其中，噪声调频干扰信号形式与目标回波信号相差较大，主要对回波信号形成覆盖式干扰；而距离假目标干扰信号形式与目标回波信号相似，能够获得和目标回波信号相同的增益，很难在信号层进行剔除。

根据本文信号重构对消算法对强LFM信号分量进行消除，图6表示对强LFM信号(在本文仿真条件下为真实目标回波信号)对消后回波信号在FRFT

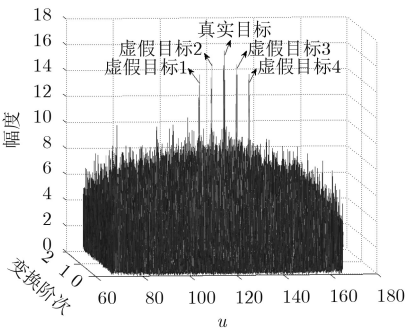


图 5 回波信号FRFT域谱分布

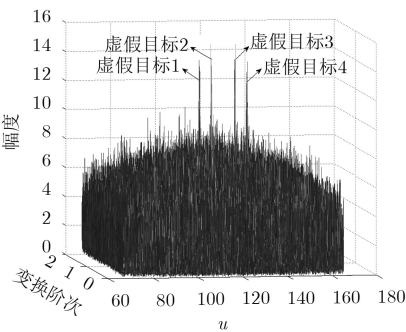


图 6 对消后FRFT域谱分布

域的谱分布情况。

由图6可以看出，经过FRFT域对消，强LFM信号分量被较完整地消除，同时，在消除过程中对其他LFM信号分量几乎没有产生影响。通过FRFT域消除算法，使得不同强度的LFM信号能够被逐个检测出来，从而减小了信号层对真实目标回波信号漏检的可能性。

以真实目标回波信号为例，对其FRFT域窄带滤波前后的脉冲压缩结果进行仿真实验，结果如图7和图8所示。

由图7和图8的对比可以看出，FRFT域窄带滤波明显增大了回波信号信干比，从而使得回波信号中的所有LFM信号能够通过恒虚警检测以较高的概率被逐个检测出来，保证了真实目标回波信号能够在空间域形成稳定的点迹。

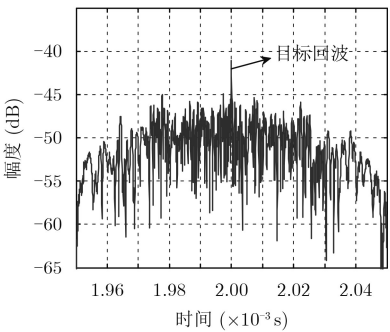


图 7 窄带滤波前脉冲压缩结果

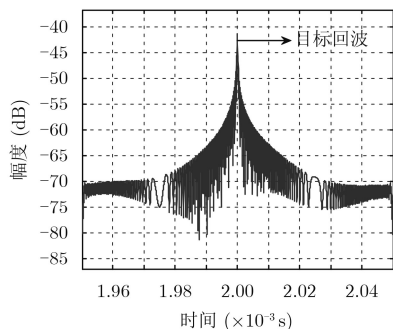


图8 窄带滤波后脉冲压缩结果

4.2 噪声点迹剔除仿真实验

经过信号层的一系列处理, 最终在空间域生成的前5个时刻的点迹情况如图9所示。

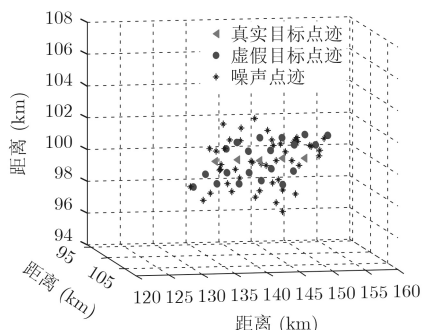


图9 空间域点迹分布

由图9可以看出, 真实目标点迹以及虚假目标点迹分布规律, 符合运动目标特性, 而噪声点迹则呈现出较强的随机性。运用3/4逻辑法对图9中的点迹进行处理得到如图10的结果。由图10可以看出, 经过3/4逻辑算法, 噪声点迹被很好地剔除, 但同时, 由于虚假点迹符合逻辑法的要求, 从而能够形成稳定虚假航迹, 所以需要通过对接下来的虚假航迹鉴别算法对虚假航迹进行剔除。

4.3 虚假航迹剔除仿真实验

由3.3.2节可知, 虚假航迹的正确鉴别率和样本数量, 即观测时长有关, 为保证对虚假航迹的正确鉴别, 对航迹连续观察20个扫描周期, 对欺骗干扰

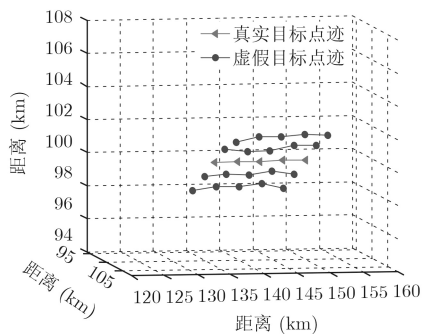


图10 3/4逻辑法后生成航迹

存在性检测算法进行仿真实验, 蒙特卡洛仿真800次, 按照3.3.1节的方法对所有航迹进行判断和量测分组, 其中 $F_\alpha = 9.2103$, 最终5个目标的量测被划分为同一集合 ω , 并判断存在距离欺骗干扰的概率达到100%。

接下来对虚假航迹鉴别算法进行仿真实验, 蒙特卡洛仿真800次, 最终得到仿真参数条件下, 虚假航迹的鉴别概率为87.56%, 在鉴别出虚假航迹之后便能够对虚假航迹进行剔除。同时, 为进一步验证算法的稳定性, 取雷达测距精度分别为100 m、300 m以及500 m, 所得到的虚假航迹正确鉴别率如图11所示。取雷达点迹样本数分别为15、35以及50, 所得到的虚假航迹正确鉴别率如图12所示。

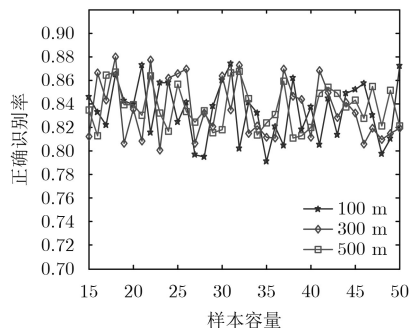


图11 测距精度对算法影响

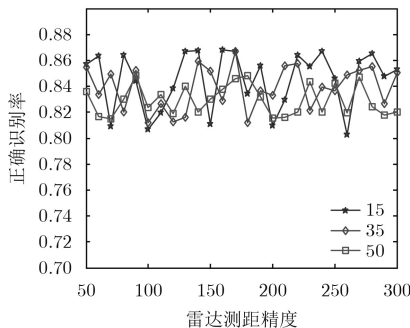


图12 样本容量对算法影响

由图11和图12可以看出, 本文的航迹鉴别算法对测距精度和样本容量的变化并不敏感, 始终能够保证80%以上的正确鉴别概率, 所以, 本文虚假航迹鉴别算法具有较高的稳定性。

5 结论

本文通过信号-数据联合处理实现了对压制-欺骗加性有源复合干扰的抑制。在信号层, 根据噪声调频干扰信号与目标信号在FRFT域的特征差异, 通过FRFT域窄带滤波处理有效实现了对压制干扰的抑制; 在数据层, 根据噪声点迹随机分布的特性, 通过3/4逻辑法有效实现了噪声点迹的剔除, 并结合距离假目标角度量测误差方差偏大的特征,

采用聚类划分的方法对真-假目标航迹进行鉴别,在此基础上完成了对虚假目标航迹的剔除。

参 考 文 献

- [1] ROJA R B and UTTARAKUMARI M. Optimization of orthogonal adaptive waveform design in presence of compound Gaussian clutter for MIMO radar[J]. *Springerplus*, 2015, 4(1): 1–12. doi: [10.1186/s40064-015-1501-x](https://doi.org/10.1186/s40064-015-1501-x).
- [2] 廖胜男, 韦杉, 文树梁, 等. 基于相位扰动的抗有源加性复合干扰技术[J]. 航天电子对抗, 2012, 28(1): 24–26. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2012.01.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2012.01.009).
LIAO Shengnan, WEI Shan, WEN Shuliang, et al. An algorithm for restraining active additive compound jamming based on phase-perturbed[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2012, 28(1): 24–26. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2012.01.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2012.01.009).
- [3] 任鹏冲, 叶广强, 刘华伟. 一种有源加性复合干扰的对抗算法研究[J]. 计算机量测与控制, 2016, 24(1): 84–88. doi: [10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2016.01.079](https://doi.org/10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2016.01.079).
REN Pengchong, YE Guangqiang, and LIU Huawei. An algorithm research for restraining active additive compound jamming[J]. *Computer Measurement & Control*, 2016, 24(1): 84–88. doi: [10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2016.01.079](https://doi.org/10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2016.01.079).
- [4] 贺照辉, 秦江敏, 马晓岩. 基于PR的雷达抗复合干扰中神经网络特征提取[J]. 空军预警学院学报, 2004, 18(3): 12–15. doi: [10.3969/j.issn.1673-8691.2004.03.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-8691.2004.03.005).
HE Zhaohui, QIN Jiangmin, and MA Xiaoyan. NN feature extraction with PR radar anti-complex-jamming[J]. *Journal of Air Force Radar Academy*, 2004, 18(3): 12–15. doi: [10.3969/j.issn.1673-8691.2004.03.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-8691.2004.03.005).
- [5] 孙殿星, 王国宏, 贺达超, 等. 雷达组网抗距离-速度欺骗复合干扰技术研究[J]. 现代防御技术, 2016, 44(3): 84–91. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2016.03.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2016.03.014).
SUN Dianxing, WANG Guohong, HE Dachao, et al. Antijamming technique in the presence of range-velocity deception compound jamming based on radar network[J]. *Modern Defense Technology*, 2016, 44(3): 84–91. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2016.03.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2016.03.014).
- [6] 户锋刚, 阮怀林. 脉冲多普勒雷达特征分析及干扰识别方法研究[J]. 舰船电子对抗, 2007, 30(3): 30–36. doi: [10.3969/j.issn.1673-9167.2007.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-9167.2007.03.008).
HU Fenggang and RUAN Huailin. Characteristic analysis of pulse Doppler radar and the study of jamming recognition method[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2007, 30(3): 30–36. doi: [10.3969/j.issn.1673-9167.2007.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-9167.2007.03.008).
- [7] 龚询, 徐海全, 王国宏, 等. SOJ与RGPO复合干扰下目标跟踪技术[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(8): 22–25. doi: [10.3969/j.issn.1002-0640.2014.08.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0640.2014.08.006).
GONG Xun, XU Haiquan, WANG Guohong, et al. Target tracking technique under SOJ and RGPO compound jamming[J]. *Fire Control & Command Control*, 2014, 39(8): 22–25. doi: [10.3969/j.issn.1002-0640.2014.08.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0640.2014.08.006).
- [8] 田原. 雷达有源复合干扰抑制算法研究与实验数据分析[D]. [硕士论文], 电子科技大学, 2013.
- [9] 陶然, 邓兵, 王越, 等. 分数阶傅里叶变换及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 11–12.
- [10] 何友, 关键, 彭应宁, 等. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 146–147.
- [11] 王瑜, 李小波, 周青松, 等. 基于FRFT窄带滤波的LFM信号研究[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(12): 41–43. doi: [10.3969/j.issn.1002-0640.2016.12.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0640.2016.12.009).
WANG Yu, LI Xiaobo, ZHOU Qingsong, et al. Study of LFM signal based on FRFT domain narrowband filter[J]. *Fire Control & Command Control*, 2016, 41(12): 41–43. doi: [10.3969/j.issn.1002-0640.2016.12.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0640.2016.12.009).
- [12] FAN H L, XU Z, CHENG S Y, et al. The parameters estimation of LFM pulse signal based on FrFT[C]. The 2016 International Conference on Mechanical Engineering and Control System, Wuhan, China, 2017: 249–257. doi: [10.1142/9789813208414_0031](https://doi.org/10.1142/9789813208414_0031).
- [13] SONG J and LIU Y. Parameter estimation of LFM signal by direct and spline interpolation based on FrFT[J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2013, 210: 41–48. doi: [10.1007/978-3-642-34528-9_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-34528-9_5).
- [14] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 35–37.
- [15] 饶彬. 对抗条件下弹道目标的雷达跟踪技术研究[D]. [博士论文], 国防科学技术大学, 2011.
- [16] 周文辉, 李琳, 陈国海. 一种有效的RGPO干扰识别算法及性能分析[J]. 电子学报, 2007, 35(6): 1165–1169. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2007.06.031](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2007.06.031).
ZHOU Wenhui, LI Lin, and CHEN Guohai. An effective algorithm for discriminating RGPO with performance analysis[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(6): 1165–1169. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2007.06.031](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2007.06.031).
- [17] ABAVISANI M and PATEL V M. Multimodal sparse and low-rank subspace clustering[J]. *Information Fusion*, 2018, 39: 168–177. doi: [10.1016/j.inffus.2017.05.002](https://doi.org/10.1016/j.inffus.2017.05.002).
- [18] ARIAS-CASTRO E and PU X. A simple approach to sparse clustering[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2017, 105(6): 217–228. doi: [10.1016/j.csda.2016.08.003](https://doi.org/10.1016/j.csda.2016.08.003).

王国宏: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达抗干扰、信息融合等。

白 杰: 男, 1993年生, 助教, 研究方向为雷达抗干扰。

孙殿星: 男, 1983年生, 讲师, 研究方向为机动目标跟踪、信息融合。

张翔宇: 男, 1986年生, 讲师, 研究方向为机动目标跟踪、信息融合。