

一种捷变频联合Hough变换的抗密集假目标干扰算法

全英汇^{*①} 陈侠达^① 阮锋^② 高霞^① 李亚超^① 邢孟道^①

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^②(西安电子工程研究所 西安 710100)

摘要: 转发式密集假目标干扰通过在距离维上产生多个虚假目标, 扰乱雷达对真实目标的检测与识别。由于虚假回波信号与真实信号高度相关, 雷达很难对其进行有效识别和抑制。而捷变频雷达通过随机改变发射相邻脉冲的载频, 大大提高了雷达的低截获和抗干扰能力。但是捷变频雷达不能完全消除干扰, 部分目标回波脉冲可能被干扰淹没, 无法很好地完成相参积累和目标检测。针对上述问题, 该文提出捷变频联合Hough变换的抗干扰方法, 首先利用脉间频率捷变技术规避大部分窄带瞄准和欺骗式干扰; 然后针对干扰信号时间上的不连续特性, 通过Hough变换和峰值提取进行干扰识别与抑制; 最终, 针对捷变频与传统动目标检测(MTD)不兼容问题, 通过稀疏重构完成目标的检测。仿真与实际雷达和干扰机对抗实验表明, 该方法可以获得良好的抗干扰性能和目标检测性能。

关键词: 电子反对抗; 密集多假目标; 频率捷变; Hough变换

中图分类号: TN957.52; TN974

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)11-2639-07

DOI: 10.11999/JEIT190010

An Anti-Dense False Target Jamming Algorithm Based on Agile Frequency Joint Hough Transform

QUAN Yinghui^① CHEN Xiada^① RUAN Feng^② GAO Xia^①
LI Yachao^① XING Mengdao^①

^①(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Forwarding dense false target jamming disturbs the detection and recognition of real targets by generating multiple false targets in the range dimension. Because the false echo signal is highly correlated with the real signal, it is difficult for radar to recognize and suppress it effectively. Frequency agile radar improves greatly the low interception and anti-jamming ability of radar by randomly changing the carrier frequency of transmitting adjacent pulses. However, agile radar can not completely eliminate the interference, some target echo pulses may be submerged by the interference, agile radar can not complete coherent accumulation and target detection well either. To solve the above problems, an anti-jamming method of frequency agility combined with Hough transform is proposed. Firstly, the inter-pulse frequency agility technology is used to avoid most narrowband aiming and deceptive jamming. Then, according to the time discontinuity of the jamming signal, Hough transform and peak extraction are used to identify and suppress the jamming. Frequency agility is incompatible with the traditional Moving Target Detection(MTD). Target detection is accomplished by sparse reconstruction. The simulation and actual radar and jammer countermeasure experiments show that the proposed method can achieve good anti-jamming performance and target detection performance.

Key words: Electronic counter-countermeasure; Dense multi-false targets; Frequency agility; Hough transform

收稿日期: 2019-01-07; 改回日期: 2019-05-08; 网络出版: 2019-05-24

*通信作者: 全英汇 yhqquan@mail.xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61303035, 61772397), 中央高校基本科研业务费专项; 西安电子科技大学研究生创新基金

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61303035, 61772397), The Fundamental Research Funds for the Central University; The Innovation Fund of Xidian University

1 引言

对相参雷达的电子干扰一直是电子对抗领域的重要课题。目前,随着电子技术的迅速发展,电子干扰机能够在相当短的时间内截获、分析和识别雷达发射信号。数字射频存储器(Digital Radio Frequency Memory, DRFM)的发明和应用使干扰的产生更加灵活,种类更加丰富,已成为雷达严重的威胁。具有DRFM的干扰机能够截获和转发雷达发射信号,产生与目标回波高度相似的假目标干扰。这些假目标能够通过脉冲压缩、相参积累获得部分处理增益,从而对相参雷达进行有效的干扰^[1-4]。对此,国内外研究学者提出了多种抗干扰方法。文献[5]采用脉间波形捷变并利用3步匹配滤波法对抗欺骗干扰,但该方法只能对抗跨脉冲重复时间(Pulse Recurrence Time, PRT)欺骗干扰,不适用于即时转发欺骗干扰的情况;文献[6]提出了一种基于特征向量分析和独立成分分析的干扰抑制方法,但算法前提是干扰信号和目标回波信号不相关;文献[7]提出了基于自适应陷波滤波和小波包分解抑制的抗干扰算法,但该方法滤波器的参数选择十分困难;文献[8]提出了几种基于匹配信号变换的变换域干扰抑制算法,如门限法,陷波滤波法和最大似然估计法(Maximum Likelihood Estimation, MLE),以MLE算法抗干扰性能最好,但是在工程上实现较为复杂。此外,有学者提出可以采用频率捷变技术来应对这种干扰的威胁。频率捷变技术主要是通过改变相邻发射脉冲载频,使干扰机无法根据侦收到的雷达信号对雷达载频进行干扰,有效地规避大部分窄带瞄准式干扰、转发式假目标前拖欺骗干扰和跨脉冲重复周期欺骗式假目标干扰等,它显著地提高了雷达的抗干扰能力。同时针对捷变频雷达相位不连续而无法进行相参积累的问题,Wang等人^[9]提出了基于Radon变换的捷变频相参积累算法(Frequency Agile Coherent Radon Transform, FA-CRT),文献[10]使用压缩感知理论(Compressed Sensing, CS)来解决相参积累问题。但是,以上方法都假设通过频率捷变措施完全避开了干扰,接收回波信号中基本不包含干扰信号。倘若有部分频点的回波信号中存在较强的干扰,使用上述方法进行目标检测,性能将大大下降。本文在此基础上,提出了捷变频联合Hough变换的抗干扰算法,该方法能够在部分回波信号中含有较强干扰的情况下有效地进行相参积累和目标检测。

2 雷达信号与干扰模型

2.1 捷变频信号模型

本文采用全相参相邻脉冲载频捷变雷达体制。

为了提高距离分辨率,基带波形采用线性调频(LFM)信号。捷变频信号模型可以表示为

$$s_T(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp(j\pi\gamma\hat{t}^2) \cdot \exp(j2\pi f_m(\hat{t} + t_m)) + \delta(\hat{t}, t_m) \quad (1)$$

其中, $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq \frac{1}{2} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$ 为窗函数, T_p 是脉冲宽度, $\gamma = B/T_p$ 为调频斜率, B 为信号带宽。

$\delta(\hat{t}, t_m)$ 表示服从高斯分布的噪声。 \hat{t} 和 t_m 分别为快时间和慢时间, $t = \hat{t} + t_m$, $t_m = mT_r$, T_r 是脉冲重复间隔(PRI)。 f_m 是第 m 个脉冲的载频

$$f_m = f_c + a(m)\Delta f, m \in \{1, 2, \dots, M\} \quad (2)$$

其中, M 为脉冲积累数。 $a(m)$ 为随机整数,被称为第 m 个脉冲的频率调制码字,取值范围 $0 \leq a(m) \leq N-1$, N 为总的跳频数,且满足 $N > M$ 。

假设观测场景中存在一个动目标,在 $t=0$ 时刻径向距离为 r_0 ,速度为 v_0 ,则回波经过接收机混频解调得到的基带信号可以表示为

$$s_r(\hat{t}, t_m) = \sigma_0 \text{rect}\left(\frac{\tau_m}{T_p}\right) \exp(j\pi\gamma(\hat{t} - \tau_m)^2) \cdot \exp(-j2\pi f_m \tau_m) + \delta(\hat{t}, t_m) \quad (3)$$

其中 $\tau_m = 2(r_0 - v_0 t_m)/c$, σ_0 为散射系数, c 为光速,式中忽略了目标的加速度。

2.2 干扰信号模型

密集假目标欺骗式干扰的基本原理是,干扰机在一定时间内对雷达信号进行采样和存储转发,形成多个不同距离的假目标。在雷达接收端,这些假目标可能散布于整个距离维上,而且假目标能量远大于目标回波。一旦假目标进入接收机波门内,将影响目标的检测^[11]。设假目标数量为 K ,产生的多假目标干扰可以表示为

$$s_j(\hat{t}, t_m) = \sum_{k=1}^K A_k s_r(\hat{t} - \Delta\tau_k, t_m) \quad (4)$$

其中, $\Delta\tau_k$ 表示各个干扰相对于目标的延时。假设干扰机通过截获部分雷达发射信号,并有针对性地有一定频段内转发产生密集假目标干扰。如果干扰频率 $f_j \in [f_{j1}, f_{j2}]$,干扰幅值为 A_k ,则第 m 个回波信号可以表示为

$$s_{ij}(\hat{t}, t_m) = s_r(\hat{t}, t_m) + \alpha \sum_{k=1}^K A_k s_m(\hat{t} - \Delta\tau_k, t_m) + \delta(\hat{t}, t_m), \alpha = \begin{cases} 0, & f_m \notin [f_{j1}, f_{j2}] \\ 1, & f_m \in [f_{j1}, f_{j2}] \end{cases} \quad (5)$$

3 Hough变换

Hough变换作为一种参数空间变换算法，自从1962年被Paul Hough提出之后，便成为直线和其他参数化形状检测的重要工具。Hough变换具有较强的稳定性和鲁棒性，可以在一定程度上避免噪声的影响，而且便于实现并行计算^[12,13]。在雷达的目标识别中，有用的回波功率总是淹没在噪声或杂波中，因此，Carlson等人将Hough变换引入到了雷达目标检测中。其变换方程可以表示为

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2} \sin(\theta + \varphi) \quad (6)$$

其中， $x = \hat{t}$, $y = t_m/T_r$, $\varphi = \tan^{-1}(y/x)$ 。 ρ , θ 分别表示为Hough参数空间中的距离和角度参数。

4 基于Hough变换的捷变频雷达抗干扰算法

4.1 算法流程

对式(5)进行匹配滤波，得到脉冲压缩后的数据空间，可以表示为

$$\begin{aligned} s_{\text{rep}}(\hat{t}, t_m) = & \alpha \sum_{k=1}^K A_k \sigma_0 \text{sinc}(\pi B(\hat{t} - \tau_m - \Delta\tau_k)) \\ & \cdot \exp(-j2\pi f_m(\Delta\tau_k + \tau_m)) \\ & + \sigma_0 \text{sinc}(\pi B(\hat{t} - \tau_m)) \exp(-j2\pi f_m \tau_m) \\ & + \delta(\hat{t}, t_m), \alpha = \begin{cases} 0, f_m \notin [f_{j1}, f_{j2}] \\ 1, f_m \in [f_{j1}, f_{j2}] \end{cases} \quad (7) \end{aligned}$$

图1给出了基于Hough变换的抗干扰方法流程图，共分如下4个步骤：

步骤1 在数据空间上设置第1门限，提取目标和干扰、抑制噪声。

步骤2 将所有通过第1门限的回波数据经Hough参数空间积累映射到参数空间。

步骤3 在参数空间上进行峰值提取，并通过逆Hough变换映射回数据空间，形成时间-距离维的目标运动轨迹。

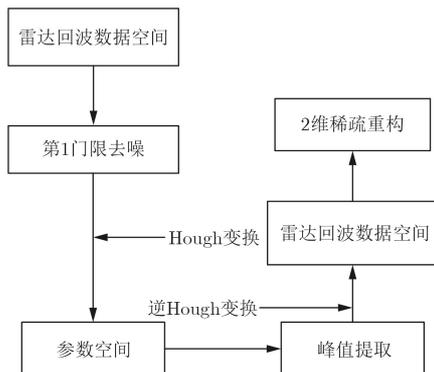


图1 基于Hough变换的抗干扰方法流程图

步骤4 对于目标进行2维稀疏重构，完成目标的检测。

4.2 第1门限选取

设置第1门限的目的是为了去除噪声，检测目标和干扰，可以按照单脉冲虚警概率确定。假设虚警概率为 P_{fa} ，噪声服从瑞利分布，则噪声功率 $p(x)$ 服从指数分布，根据雷达原理有

$$P_{\text{fa}} = \int_{\eta}^{\infty} p(x) dx = e^{-\eta} \quad (8)$$

第1门限值 η 为

$$\eta = -\ln(P_{\text{fa}}) \quad (9)$$

4.3 Hough参数空间积累方法

脉冲压缩回波数据经过第1门限的选择，可以去除大部分噪声，然后进行Hough变换，在参数空间进行积累。标准Hough参数空间积累方法是将回波功率累加后映射到参数空间，在信噪比较高的情况下，这样做能有效减少参数空间中局部峰值对目标检测的影响，利于峰值的提取处理。但是，如果存在多个目标回波能量，就会造成微弱目标被强目标的旁瓣所掩盖^[14]。当干扰能量远远大于目标能量时，为了检测出微弱的目标，需要先对进行Hough变换前的数据空间进行二值化；将过第1门限的点幅值设为1，低于第1门限的点幅值设为0；这样预处理之后，再进行Hough变换，则得到的参数空间幅值大小仅与检测数据空间中的直线长度相关，而与能量大小无关。

将脉冲压缩回波数据经过第1门限的选择，并进行二值化处理，可以得到

$$z(\hat{t}, t_m) = \begin{cases} \frac{s_{\text{rep}}(\hat{t}, t_m)}{|s_{\text{rep}}(\hat{t}, t_m)|}, & |s_{\text{rep}}(\hat{t}, t_m)| > \eta \\ 0, & |s_{\text{rep}}(\hat{t}, t_m)| < \eta \end{cases} \quad (10)$$

通过Hough变换，将数据空间映射到参数空间，可以得到积累矩阵 $R(\rho, \theta)$

$$R(\rho, \theta) = \text{HT}[z(\hat{t}, t_m)] \quad (11)$$

其中，HT[·]表示Hough变换。

4.4 Hough参数空间峰值提取

在一个相参积累周期(CPI)内，目标运动轨迹可以近似看成一条直线。因此，将雷达回波数据从数据空间转换到参数空间之后，目标能量将在同一积累单元内得到积累，形成期望峰值；同时干扰和噪声也可能在部分积累单元中得到积累，形成伪峰。为了得到所有备选的积累单元，通常设定第2门限进行峰值提取。但是，由于伪峰积累的影响，备选积累单元数目通常大于实际目标数目。因

此,针对这些直线的估计参数,需要用一种快速准确的方法来提取目标运动轨迹。为了能精确检测期望直线,同时有效地避免伪峰现象,采用局部算子法进行峰值提取。对于期望峰值,它是由一系列正弦曲线叠加而成的,在参数空间中,它沿正弦曲线的切线方向分布的积累值变化缓慢,沿法线方向分布的积累值变化剧烈;而伪峰是随机产生的,没有这种分布特征,利用这种差别可以提取期望峰值,抑制伪峰。

对于任意积累单元 $R(\rho_i, \theta_j)$,其值为 L ,则代表有 L 条正弦曲线进过该单元,其中第 l 条正弦曲线在该处的导数为

$$\frac{d\rho}{d\theta} = \sqrt{x_l^2 + y_l^2} \cos(\theta_j + \varphi_l), l = 1, 2, \dots, L \quad (12)$$

在参数空间中,该正弦曲线的斜率为

$$t_l = \frac{dr}{d\theta} \cdot d\theta = \sqrt{x_l^2 + y_l^2} \cos(\theta_j + \varphi_l) d\theta, \\ l = 1, 2, \dots, L \quad (13)$$

对应的角度为

$$\psi_l = \arctan \left(-1 / \left(\sqrt{x_l^2 + y_l^2} \cos(\theta_j + \varphi_l) d\theta \right) \right), \\ l = 1, 2, \dots, L \quad (14)$$

在该单元,各正弦曲线的法线角度的均值为

$$\psi = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \psi_l \quad (15)$$

将参数空间视为2维图像,采用式(16)对其进行加权滤波。每个积累单元的值为该单元的积累值和其邻域中其它单元的差值的加权求和。权值是它们对应矢量方向与式(15)描述的平均法线方向的夹角 β 的余弦,即相当于将这些差别投影到平均法线方向上。

$$R(\rho_i, \theta_j) = \sum_{p=i-1}^{p=i+1} \sum_{q=j-1}^{q=j+1} (R(\rho_p, \theta_q) - R(\rho_i, \theta_j)) \\ \cdot \cos \beta_{pq} \quad (16)$$

式(16)相当于一个局部算子,利用各夹角的余弦值作为加权系数,沿法线方向的变化得到进一步加强,对于沿切线方向的变化基本不做改变。于是期望峰值得到加强,相对应的伪峰得到抑制。对参数空间进行局部算子滤波后,通过设置阈值进行峰值提取,再通过逆Hough变换,将参数空间映射到数据空间,就可以得到目标的运动轨迹。在数据空间中,将不在目标运动轨迹上的单元幅值置0,保留目标的数据信息。

4.5 2维高分辨稀疏重构

经过上述的方法去除干扰后,可以认为雷达回波数据中只含有目标信号与噪声,可以表示为

$$s_{\text{fit}}(\hat{t}, t_m) = s_{\text{rep}}(\hat{t}, t_m) \cdot \text{IHT}[R(\rho, \theta)] \\ = \sigma_0 \text{sinc}(\pi B(\hat{t} - \tau_m)) \cdot \exp \left(-j4\pi f_0 \frac{r_0}{c} \right) \\ \cdot \exp \left(-j4\pi \Delta f \frac{r_0}{c} a(m) \right) \\ \cdot \exp \left(-j4\pi f_0 \frac{r_0 T_r}{c} \left(1 + \frac{a(m)\Delta f}{f_0} \right) m \right) \\ + \delta_1(\hat{t}, t_m) \quad (17)$$

其中, $\text{IHT}[\cdot]$ 表示Hough逆变换, $\delta_1(\hat{t}, t_m)$ 为噪声项。

经过干扰抑制后,一个距离单元内的目标一般较少,目标场景具有稀疏性,则可以通过压缩感知进行高分辨的场景重构^[15-17]。将目标场景表示为距离-速度2维平面,该平面由 $K \times L$ 的2维独立栅格点组成。其中,场景沿距离向共有 K 个独立的点,场景沿速度方向共有 L 个独立的点。使

$$\left. \begin{aligned} \zeta_{k,l} &= A_{k,l} \cdot \exp \left(-j4\pi f_0 \frac{r_0}{c} \right) \\ p_k(m) &= \exp \left[-j4\pi \Delta f \frac{r_0}{c} a(m) \right] \\ q_l(m) &= \exp \left[-j4\pi f_0 \frac{r_0 T_r}{c} \eta \right] \\ \eta(m) &= \left(1 + \frac{a(m)\Delta f}{f_0} \right) f_0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中, $1 \leq m \leq M$, $1 \leq k \leq K$, $1 \leq l \leq L$, $\zeta_{k,l}$ 是后向散射系数, $p_k(m)$ 是距离相位项, $q_l(m)$ 是速度相位项,则第 k 个高分辨距离单元,第 l 个速度分辨单元的目标可以表示成

$$s_{k,l}(t_m) = \zeta_{k,l} p_k(m) q_l(m) + n(t_m) \quad (19)$$

构建感知矩阵为

$$\mathbf{E} = \left\{ \underbrace{\mathbf{e}_{1,1} \cdots \mathbf{e}_{1,L}}_L \cdots \cdots \underbrace{\mathbf{e}_{K,1} \cdots \mathbf{e}_{K,L}}_L \right\}_{M \times (K \cdot L)} \quad (20)$$

$$\mathbf{e}_{k,l} = p_k(m) \odot q_l(m) \quad (21)$$

则回波信号可以表示成

$$\mathbf{x} = \mathbf{E}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\delta} \quad (22)$$

其中, $\boldsymbol{\delta}$ 为噪声向量。

目标参数估计问题就转换为通过测量矩阵 \mathbf{x} 和感知矩阵 \mathbf{E} 来重构未知向量 $\boldsymbol{\theta}$ 的凸优化问题。通过求解 L_1 范数优化问题对目标幅值和进行估计,即

$$\left\langle \hat{\boldsymbol{\theta}} \right\rangle = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}} (\|\boldsymbol{\theta}\|_1, \|\mathbf{x} - \mathbf{E}\boldsymbol{\theta}\|_2 \leq \varepsilon) \quad (23)$$

其中,稀疏向量 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 表示目标幅值的估计, ε 表示噪声电平。 $\boldsymbol{\theta}$ 可以通过重建算法得到,进而就可以得到目标的距离速度和幅值信息。

4.6 算法复杂度分析

雷达目标检测方法在实际应用时通常需要较好的时效性，这里对算法的复杂度进行评估。本算法中计算量较大的主要是Hough变换、逆Hough变换和OMP算法。其中Hough变换和逆变换计算复杂度约为 κMH ， κ 为量化后角度 θ 的分割数目， H 为距离向分辨单元的数量^[12]。OMP计算复杂度为 $2\beta ML^2 + (2\beta^2 + 2\beta)M^2$ ， β 为迭代次数^[18]。以本文仿真数据为例， $\kappa = 180$ ， $H = 230$ ， $M = 64$ ， $L = 64$ ， $\beta = 10$ ，则总的运行时间约为 9×10^6 次复数运算，采用多片主流的高性能多核信号处理器TMS320C6678（浮点处理能力为160GFLOPs），可以在一个CPI内完成实时处理。

5 实验结果与分析

5.1 仿真数据分析

为了验证本文方法的有效性，使用目标检测概率来衡量干扰抑制性能。采用的1组典型的雷达参数进行仿真，其仿真参数如表1所示。这里暂不考虑稀疏重构的网格失配问题。以下仿真均考虑干扰机产生10个干扰信号，各个干扰之间的时延间隔为200 ns，干扰频段为10~10.5 GHz。

表1 雷达工作及目标参数

指标参数	取值	指标参数	取值
脉冲宽度	4 μ s	脉冲重复频率	2.5 kHz
信号带宽	24 MHz	采样频率	48 MHz
脉冲组个数	64 个	初始载频	10 GHz
跳频总数	100 个	步进带宽	20 MHz
目标距离	4 km	目标速度	2 km/s

5.1.1 干扰抑制性能与信噪比的关系

设干信比(JSR)分别设置10 dB, 20 dB。给出不使用抗干扰算法和使用所提出的抗干扰算法条件下，检测概率随信噪比从-10~-30 dB增长时相应的变化。图2给出了500次蒙特卡洛仿真结果。

由图2可见，在没有干扰的条件下，随着信噪

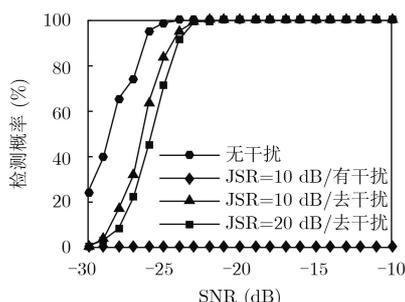


图2 未受干扰与进行干扰抑制前后检测概率随信噪比变化的关系

比的增加，噪声对2维稀疏重构的影响逐渐减小，可以更好地重构目标场景、检测目标。在JSR=10 dB且未使用抗干扰措施条件下，目标的检测概率恒为0，说明干扰严重地影响了目标场景的稀疏重构，使得雷达不能有效地检测目标。而使用所提出的干扰抑制算法对同样的仿真雷达回波进行目标检测后，可以看到，在JSR=10 dB和JSR=20 dB的条件下，随着信噪比的增加，目标检测概率在不断地增加。且当信噪比大于-20 dB时，目标检测概率接近于1，说明干扰被抑制得更加彻底。

5.1.2 干扰抑制性能与干信比的关系

当干扰功率不断增强时，干扰的旁瓣会影响目标运动轨迹的检测与目标的2维高分辨稀疏重构。本仿真给出了在信噪比为-23 dB的情况下，目标检测概率随干信比从0~50 dB增长时相应的变化。图3给出了500次蒙特卡洛仿真结果。

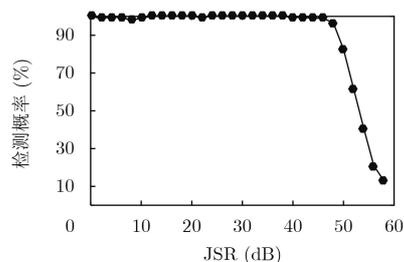


图3 检测概率随干信比变化的关系

由图3可以看到，在干扰功率不大时，干扰信号的旁瓣功率不能完全遮盖目标信号，通过Hough变换能够检测到目标运动轨迹，并去除干扰。对目标的检测概率能达到90%以上。当干扰功率增大到一定阈值时，干扰的旁瓣功率会完全遮盖目标信号，干扰抑制算法将失效，检测性能将明显恶化。

5.2 实测数据分析

下面通过实测的外场对抗实验数据处理结果，进一步验证本文算法的有效性。该实验中我方雷达分别使用PD模式和捷变频模式，探测海上船舶目标，同时，船舶上载有对方干扰机对我方雷达实施干扰。

PD模式工作在Ka波段，信号脉冲宽度为2 μ s，脉冲重复周期为240 μ s，信号带宽为25 MHz，采样频率为60 MHz。图4(a)为PD模式回波脉冲压缩图，图4(b)为其俯视图，可以看到雷达的大部分回波都受到了干扰，最大干信比为31 dB。图4(c)为PD雷达MTD方法的目标检测结果，明显可见在强干扰环境下，PD雷达无法正确检测目标。

捷变频模式工作在Ka波段，信号脉冲宽度为2 μ s，脉冲重复周期为240 μ s，信号带宽为25 MHz，采

样频率为60 MHz，跳频总数为256个，128个脉冲为一组。图5(a)为捷变频雷达回波脉冲压缩图，图5(b)为其俯视图，可以看到采用频率捷变体制后，干扰数量明显减少了，受到的干扰信号强度也

要明显小于PD雷达。图5(c)为捷变频雷达脉冲压缩后数据经过2维高分辨稀疏重构得到的速度-距离2维图，可以看到干扰信号破坏了回波的部分相位信息，重构效果差。

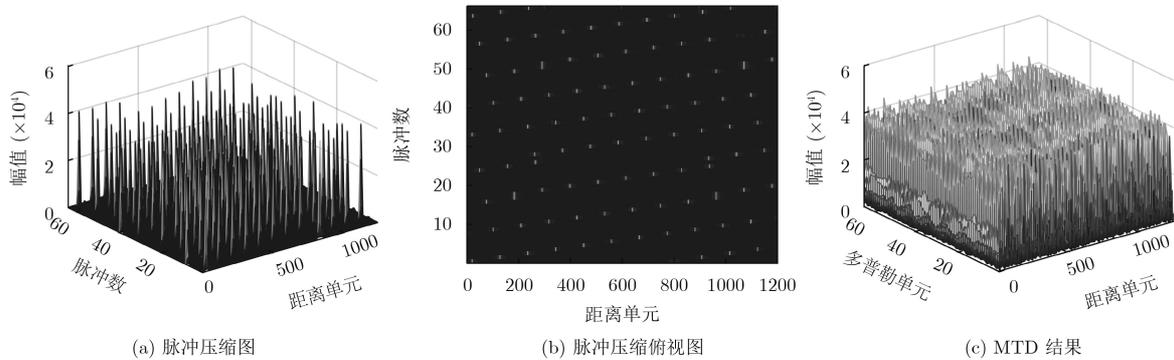


图4 PD雷达处理结果

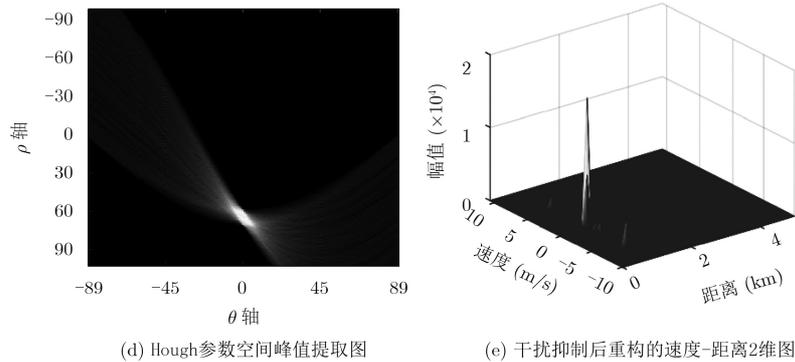
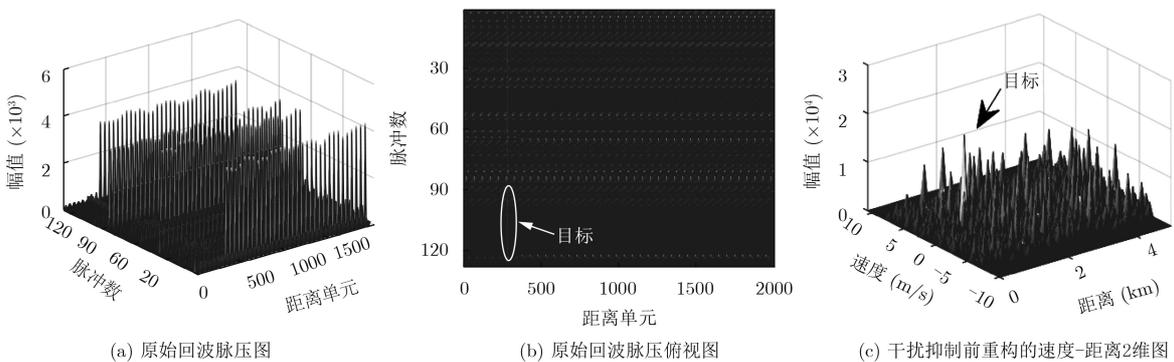


图5 干扰抑制前后捷变频处理结果对比图

为了避免对假目标的错误检测，使用本文算法进行处理。先通过Hough变换将脉冲压缩后数据变换到参数空间并通过峰值提取完成目标运动轨迹的提取与干扰的抑制，然后再通过逆Hough变换映射回数据空间并进行2维高分辨稀疏重构，得到速度-距离重构图，分别如图5(d), 图5(e)所示。可以明显地看到干扰得到了抑制，目标得到有效的积累，验证了所提方法的有效性和可靠性。

6 结束语

随着现代电子技术的不断发展，电子对抗领域的干扰与反干扰手段也在不断进步，捷变频由于其优异的低截获和抗干扰能力被广泛地应用到雷达系统中。本文提出了一种捷变频联合Hough变换的抗干扰算法，该方法通过将雷达回波数据从数据空间转换到Hough参数空间，并进行峰值提取完成目标运动轨迹的提取与干扰的抑制，通过2维稀疏重构

完成目标的检测。仿真实验与实测数据分析验证了本文方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] SHI Xiaoran, ZHOU Feng, ZHAO Bo, *et al.* Deception jamming method based on micro-Doppler effect for vehicle target[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(6): 1071–1079. doi: [10.1049/iet-rsn.2015.0371](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0371).
- [2] FENG Dejun, XU Letao, PAN Xiaoyi, *et al.* Jamming wideband radar using interrupted-sampling repeater[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(3): 1341–1354. doi: [10.1109/TAES.2017.2670958](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2670958).
- [3] ZHOU Chang, TANG Ziyue, DAI Yu, *et al.* Anti-intermittent sampling repeater jamming method based on convex optimization techniques[C]. 2016 CIE International Conference on Radar, Guangzhou, China, 2016: 1–5. doi: [10.1109/RADAR.2016.8059595](https://doi.org/10.1109/RADAR.2016.8059595).
- [4] 冯德军, 王俊杰, 王俊卿. 移频导前假目标的特性分析及其鉴别方法[J]. *雷达学报*, 2017, 6(4): 325–331. doi: [10.12000/JR17026](https://doi.org/10.12000/JR17026).
FENG Dejun, WANG Junjie, and WANG Junqing. Signature analysis and discrimination method of preceded Frequency-shift false target[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(4): 325–331. doi: [10.12000/JR17026](https://doi.org/10.12000/JR17026).
- [5] SOUMEKH M. SAR-ECCM using phase-perturbed LFM chirp signals and DRFM repeat jammer penalization[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 191–205. doi: [10.1109/TAES.2006.1603414](https://doi.org/10.1109/TAES.2006.1603414).
- [6] ZHANG Shuning, XIE Wei, ZHU Hang, *et al.* Combined eigenvector analysis and independent component analysis for multi-component periodic interferences suppression in PRCPM-PD detection system[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 12552–12562. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2720589](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2720589).
- [7] MUSUMECI L, CURRAN J T, and DOVIS F. A comparative analysis of adaptive notch filtering and wavelet mitigation against jammers interference[J]. *Navigation*, 2016, 63(4): 533–550. doi: [10.1002/navi.167](https://doi.org/10.1002/navi.167).
- [8] SHEN Hao and PAPANDREOU-SUPPAPPOLA A. Wideband time-varying interference suppression using matched signal transforms[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(7): 2607–2612. doi: [10.1109/TSP.2005.849218](https://doi.org/10.1109/TSP.2005.849218).
- [9] WANG Dinghe, BAO Qinglong, NIU Zhaodong, *et al.* Long time coherent integration method for frequency agile radar[C]. The 11th European Radar Conference, Rome, Italy, 2014: 553–556. doi: [10.1109/EuRAD.2014.6991330](https://doi.org/10.1109/EuRAD.2014.6991330).
- [10] QUAN Yinghui, WU Yaojun, LI Yachao, *et al.* Range-Doppler reconstruction for frequency agile and PRF-jittering radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(3): 348–352. doi: [10.1049/iet-rsn.2017.0421](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0421).
- [11] 卢刚, 唐斌, 罗双才, 等. LFM雷达中DRFM假目标自适应对消方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(8): 1760–1764. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2011.08.16](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2011.08.16).
- LU Gang, TANG Bin, LUO Shuangcai, *et al.* Adaptive cancellation of DRFM false targets for LFM radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(8): 1760–1764. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2011.08.16](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2011.08.16).
- [12] 孙丰荣, 刘积仁. 快速霍夫变换算法[J]. *计算机学报*, 2001, 24(10): 1102–1109. doi: [10.3321/j.issn:0254-4164.2001.10.013](https://doi.org/10.3321/j.issn:0254-4164.2001.10.013).
- SUN Fengrong and LIU Jiren. Fast Hough transform algorithm[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2001, 24(10): 1102–1109. doi: [10.3321/j.issn:0254-4164.2001.10.013](https://doi.org/10.3321/j.issn:0254-4164.2001.10.013).
- [13] 刘向阳, 杨君刚, 孟进, 等. 低信噪比下基于Hough变换的前视阵列SAR稀疏三维成像[J]. *雷达学报*, 2017, 6(3): 316–323. doi: [10.12000/JR17011](https://doi.org/10.12000/JR17011).
- LIU Xiangyang, YANG Jungang, MENG Jin, *et al.* Sparse Three-dimensional imaging based on hough transform for Forward-looking array SAR in low SNR[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(3): 316–323. doi: [10.12000/JR17011](https://doi.org/10.12000/JR17011).
- [14] STEIN J J and BLACKMAN S S. Generalized correlation of multi-target track data[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1975, AES-11(6): 1207–1217. doi: [10.1109/TAES.1975.308178](https://doi.org/10.1109/TAES.1975.308178).
- [15] QUAN Yinghui, LI Yachao, WU Yaojun, *et al.* Moving target detection for frequency agility radar by sparse reconstruction[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(9): 094703. doi: [10.1063/1.4962700](https://doi.org/10.1063/1.4962700).
- [16] HUANG Tianyao, LIU Yimin, MENG Huadong, *et al.* Randomized step frequency radar with adaptive compressed sensing[C]. 2011 IEEE RadarCon, Kansas City, USA, 2011: 411–414. doi: [10.1109/RADAR.2011.5960571](https://doi.org/10.1109/RADAR.2011.5960571).
- [17] 陈小龙, 关键, 何友, 等. 高分辨稀疏表示及其在雷达动目标检测中的应用[J]. *雷达学报*, 2017, 6(3): 239–251. doi: [10.12000/JR16110](https://doi.org/10.12000/JR16110).
- CHEN Xiaolong, GUAN Jian, HE You, *et al.* Sparse representation and its applications in radar moving target detection[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(3): 239–251. doi: [10.12000/JR16110](https://doi.org/10.12000/JR16110).
- [18] MARQUES E C, MACIEL N, NAVINER L, *et al.* A review of sparse recovery algorithms[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 1300–1322. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2886471](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2886471).

全英汇: 男, 1981年生, 博士, 教授, 研究方向为雷达实时信号处理。

陈侠达: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理。

阮 锋: 男, 1980年生, 硕士, 研究方向为雷达信号处理。

高 霞: 女, 1996年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理。

李亚超: 男, 1981年生, 博士, 教授, 研究方向为雷达成像和实时信号处理。

邢孟道: 男, 1975年生, 博士, 教授, 研究方向为SAR/ISAR成像、动目标检测等。