

## 基于差分特征的间歇采样转发干扰辨识与抑制方法

盖季好<sup>①②</sup> 姜维<sup>③</sup> 张凯翔<sup>①</sup> 梁振楠<sup>①</sup> 陈新亮<sup>\*①②④</sup> 刘泉华<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(卫星导航电子信息技术教育部重点实验室(北京理工大学) 北京 100081)

<sup>②</sup>(北京理工大学重庆创新中心 重庆 401120)

<sup>③</sup>(电子信息控制重点实验室 成都 610036)

<sup>④</sup>(北京理工大学长三角研究院(嘉兴) 嘉兴 314019)

**摘要:** 间歇采样转发式干扰机通过对其接收到的雷达发射信号进行采样、存储、处理和多次转发,在雷达接收端形成逼真的假目标干扰效果。为提升上述干扰场景下的雷达探测性能,该文提出了一种新的信号差分特征提取方法,在此基础上,利用目标回波和干扰信号在差分特征空间的差异设计判决准则,从而在有效辨识并抑制干扰的同时实现目标检测。仿真结果表明:该方法干扰抑制效果显著,相比于3种典型的时频域滤波算法等效信噪比改善4.2 dB以上。

**关键词:** 间歇采样转发干扰; 差分特征; 干扰辨识; 干扰抑制; 目标检测

中图分类号: TN974

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2023)01-0186-11

DOI: 10.12000/JR22058

**引用格式:** 盖季好, 姜维, 张凯翔, 等. 基于差分特征的间歇采样转发干扰辨识与抑制方法[J]. 雷达学报, 2023, 12(1): 186–196. doi: 10.12000/JR22058.

**Reference format:** GAI Jiyu, JIANG Wei, ZHANG Kaixiang, *et al.* A method for interrupted-sampling repeater jamming identification and suppression based on differential features[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(1): 186–196. doi: 10.12000/JR22058.

## A Method for Interrupted-Sampling Repeater Jamming Identification and Suppression Based on Differential Features

GAI Jiyu<sup>①②</sup> JIANG Wei<sup>③</sup> ZHANG Kaixiang<sup>①</sup> LIANG Zhennan<sup>①</sup>

CHEN Xinliang<sup>\*①②④</sup> LIU Quanhua<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Key Laboratory of Electronic and Information Technology in Satellite Navigation  
(Beijing Institute of Technology), Ministry of Education, Beijing 100081, China)

<sup>②</sup>(Beijing Institute of Technology Chongqing Innovation Center, Chongqing 401120, China)

<sup>③</sup>(Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu 610036, China)

<sup>④</sup>(Yangtze Delta Region Academy of Beijing Institute of Technology, Jiaying 314019, China)

**Abstract:** The interrupted-sampling repeater jammer can sample, store, process and transmit part of the radar transmitter signal multiple times and the fake targets will form on the radar receiver. To improve the radar performance in the aforementioned jamming scenario, in this study, a new signal differential feature extraction method is proposed, and a judgment criterion is formulated based on the difference between the target echo and the Interrupted-Sampling Repeater Jamming (ISRJ) in the differential feature space to effectively identify and suppress the ISRJ while achieving target detection. Simulation results show that the proposed method has a remarkable ISRJ suppression performance. The equivalent signal-to-noise ratio is improved by at least 4.2 dB compared with three typical time-frequency domain filtering algorithms.

收稿日期: 2022-04-02; 改回日期: 2022-05-24; 网络出版: 2022-06-21

\*通信作者: 陈新亮 chenxinliang@bit.edu.cn \*Corresponding Author: CHEN Xinliang, chenxinliang@bit.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61771050), 电子信息控制重点实验室开放基金(6142105190313), 重庆市自然科学基金(2020ZX3100039)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771050), Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory (6142105190313), The Natural Science Foundation of Chongqing (2020ZX3100039)

责任编辑: 全英汇 Corresponding Editor: QUAN Yinghui

**Key words:** Interrupted-Sampling Repeater Jamming (ISRJ); Differential features; Jamming identification; Jamming suppression; Target detection

## 1 引言

现代雷达面临的电磁环境日益复杂, 各类电子干扰严重制约了雷达探测性能。采用数字射频存储 (Digital Radio Frequency Memory, DRFM) 技术的间歇采样转发式干扰机通过对雷达发射信号进行切片采样、重复转发, 在雷达接收端形成多假目标干扰效果, 具有使用灵活、适应性强、威胁性大的特点, 已成为雷达干扰技术的主流方式之一<sup>[1-8]</sup>。

随着间歇采样转发干扰技术的发展, 国内外诸多学者在空域、波形域、时频域对干扰的辨识与抑制方法开展了大量研究。在空域, 文献<sup>[9]</sup>利用多通道阵列自适应波束形成技术实现干扰抑制, 但当干扰机位于雷达发射波束主瓣时, 在空域抑制干扰的同时也会造成目标能量的严重损失<sup>[10]</sup>。在波形域, 可通过设计脉内正交波形<sup>[11,12]</sup>、多普勒敏感波形<sup>[13,14]</sup>、失配滤波器<sup>[15-17]</sup>有效抑制间歇采样转发干扰, 但是此类方法需要求解复杂的波形优化问题, 难以实时应用于快速变化的干扰场景。在时频域辨识并抑制间歇采样转发干扰的方法主要有两类: 一是由时频图估计信源时频参数, 辨识并重构干扰, 然后与雷达接收信号作差以实现干扰抑制<sup>[18]</sup>; 二是基于时频图构造时频域带通滤波器以抑制干扰<sup>[19-21]</sup>。其中文献<sup>[19,20]</sup>对去斜后的雷达接收信号做时频分析, 提取纯目标片段构造时频域带通滤波器; 文献<sup>[21]</sup>对雷达接收信号的脉压结果做时频分析, 提取时频图频率维峰值3 dB宽度特征以辨识目标与干扰, 并根据辨识结果设计滤波器以获得仅含目标的时频图。上述时频域干扰辨识与抑制方法均需做短时傅里叶变换进行时频分析。短时傅里叶变换在时域滑窗降低了时频域分辨率, 对于第1类方法, 会降低参数估计精度, 影响干扰信号的重构与抑制; 对于第2类方法, 会导致纯目标样本的污染或丢失, 影响带通滤波器的构造。另外时频分析复杂度高且需要较大的存储空间, 对雷达系统有较高的硬件要求。

不同于传统空域、波形域、时频域的间歇采样转发干扰抑制方法, 本文考虑在原匹配滤波的过程中添加“差分窗”以提取雷达接收信号的多阶差分特征, 利用目标回波与干扰在差分域上的差异, 以第1阶差分特征与其他阶差分特征总能量之比为统计量, 在辨识并抑制干扰的同时实现目标的检测。所提方法不需进行复杂的寻优运算、时频分析, 且有较好的干扰辨识与抑制、目标检测性能, 适用于工程实践。

## 2 原理

### 2.1 信号建模

假设雷达发射信号为矩形包络线性调频信号, 写为

$$s_0(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_P}\right) \exp[j\varphi(t)] \quad (1)$$

其中,  $T_P$ 是发射信号脉宽,  $\text{rect}(t/T_P)$ 表示宽度为 $T_P$ 的矩形窗, 定义为

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T_P}\right) = \begin{cases} 1, & 0 < t < T_P \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

发射信号的相位

$$\varphi(t) = 2\pi f_0 t + \pi k t^2 \quad (3)$$

其中,  $f_0$ 是载频,  $k$ 是线性调频信号的调频斜率。设目标到雷达的距离为 $R_0$ , 目标回波信号可表示为

$$s_T(t) = A_T s_0(t - \tau_0) = A_T \text{rect}\left(\frac{t - \tau_0}{T_P}\right) \cdot \exp[j\varphi(t - \tau_0)] \quad (4)$$

其中,  $A_T$ 是目标回波幅度,  $\tau_0 = 2R_0/c$ ,  $c$ 是光速。

间歇采样转发式干扰机对采集到的雷达发射信号进行切片采样、存储、转发, 本文考虑基本的间歇采样重复转发干扰模型<sup>[21]</sup>: 设干扰机采样 $N_S$ 次, 采样结束后立即重复转发 $N_R$ 次, 雷达接收到的干扰信号可表示为

$$s_J(t) = A_J \sum_{n_1=1}^{N_R} \sum_{n_2=0}^{N_S-1} \text{rect}\left(\frac{t - \tau_S - n_1 T_J - n_2 T_S}{T_J}\right) \cdot \exp[j\varphi(t - \tau_S - n_1 T_J - n_2 T_S)] \quad (5)$$

其中,  $A_J$ 是干扰幅度,  $\tau_S$ 是干扰机与雷达之间距离对应的延时,  $T_J$ 是切片宽度,  $T_J < T_P$ ,  $T_S$ 是干扰机 $N_S$ 次采样的时间间隔。间歇采样转发干扰的采样、转发过程如图1所示。

这样, 雷达接收信号可以写为

$$s(t) = s_T(t) + s_J(t) + n(t) \quad (6)$$

其中,  $n(t)$ 是噪声分量。

### 2.2 差分特征

常规雷达采用的匹配滤波处理, 即脉冲压缩过程, 可表示为

$$x(t) = s(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (7)$$

其中, 符号 $*$ 表示卷积,  $h(t) = s_0^*(-t)$ 是匹配滤波器的冲激响应函数<sup>[1]</sup>。匹配滤波也可以视为对目标回波的特征提取, 但它所提取的一维特征仅适用于区分目标回波和噪声, 无法区分目标回波与干扰。

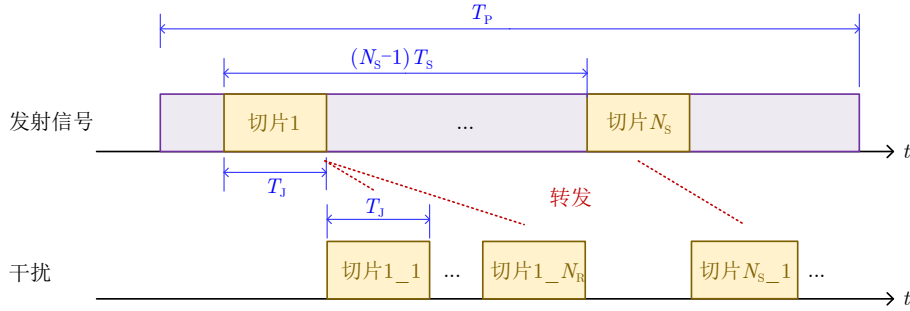


图1 间歇采样转发干扰示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ISRJ

为有效区分目标回波与干扰，考虑利用如式(8)

$$w_M(t) = \sum_{m=0}^{M-1} c_M(m) \text{rect} \left( \frac{-t - mT_C}{T_C} \right) \quad (8)$$

所示的分段窗函数 $w_M(t)$ 对 $h(t)$ 加权以构造一种冲激响应函数为

$$\tilde{h}_M(t) = w_M(t)h(t) \quad (9)$$

的滤波器。其中，分段窗函数 $w_M(t)$ 将长度为 $T_P$ 的区间平均分成了 $M$ 等份，每份的长度为 $T_C = T_P/M$ ，每份的取值记为 $c_M(m)$ ， $m = 0, 1, \dots, M-1$ 。为了使该滤波器对目标回波的响应为0，而对干扰信号的响应非0，该滤波器的冲激响应函数 $\tilde{h}_M(t)$ 应满足

$$\begin{cases} s_T(t) * \tilde{h}_M(t) = 0 \\ s_J(t) * \tilde{h}_M(t) \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\tilde{c}_M(m) = \begin{cases} c_{M-1}(m) - c_{M-1}(m-1), & m = 0, 1, \dots, M-1 \\ 0, & m < 0, m > M \end{cases} \quad (M > 1) \quad (12)$$

$$c_M(m) = \frac{\tilde{c}_M(m)}{\sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} |\tilde{c}_M(m)|^2}}, \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad (M > 1) \quad (13)$$

可见：在 $M > 1$ 时有

$$\sum_{m=0}^{M-1} c_M(m) = 0 \quad (14)$$

本文将雷达接收信号通过 $\tilde{h}(t)$ 的响应定义为信号的差分特征，提出采用如

$$x_M(t) = s(t) * \tilde{h}_M(t) = s(t) * (w_M(t)h(t)) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau)w_M(t-\tau)h(t-\tau) d\tau \quad (15)$$

所示的第 $M$ 阶差分特征提取方法， $\tilde{h}(t)$ 称为差分参考信号， $w_M(t)$ 称为差分窗函数。特别地，当 $M = 1$ 时，对应的第1阶差分特征 $x_1(t)$ 即为常规匹配滤波结果。

这样，雷达接收信号中目标分量的第 $M$ 阶差分特征可表示为

$$\begin{aligned} x_{TM}(t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} s_T(\tau)w_M(t-\tau)h(t-\tau) d\tau \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} \int_{t+mT_C}^{t+(m+1)T_C} A_T c_M(m) \text{rect} \left( \frac{\tau - \tau_0}{T_P} \right) \exp(j\varphi(\tau - \tau_0)) \exp(-j\varphi(\tau - t)) d\tau \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} A_T c_M(m) \exp(j\varphi_T(t)) \int_{t+mT_C}^{t+(m+1)T_C} \text{rect} \left( \frac{\tau - \tau_0}{T_P} \right) \exp(j2\pi k(t - \tau_0)\tau) d\tau \end{aligned} \quad (16)$$

其中

为此，本文选取窗函数的各项系数 $c_M(m)$ ， $m = 0, 1, \dots, M-1$ 为如表1所示的归一化差分序列。

表1 归一化差分序列

Tab. 1 Normalized differential sequence

$M$	各项系数 $c_M(m)$ , $m = 0, 1, \dots, M-1$
1	1
2	$1/\sqrt{2}, -1/\sqrt{2}$
3	$1/\sqrt{6}, -2/\sqrt{6}, 1/\sqrt{6}$
4	$1/2\sqrt{5}, -3/2\sqrt{5}, 3/2\sqrt{5}, -1/2\sqrt{5}$
5	$1/\sqrt{70}, -4/\sqrt{70}, 6/\sqrt{70}, -4/\sqrt{70}, 1/\sqrt{70}$

该归一化差分序列满足

$$c_1(m) = \begin{cases} 1, & m = 0 \\ 0, & m \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\varphi_T(t) = 2\pi f_0(t - \tau_0) - \pi k(t - \tau_0)(t + \tau_0) \quad (17)$$

在目标位置处有

$$x_{TM}(\tau_0) = \sum_{m=0}^{M-1} \int_{\tau_0+mT_C}^{\tau_0+(m+1)T_C} A_T c_M(m) d\tau = A_T T_C \sum_{m=0}^{M-1} c_M(m) = \begin{cases} A_T T_P, & M = 1 \\ 0, & M > 1 \end{cases} \quad (18)$$

同理, 雷达接收信号中干扰分量的第 $M$ 阶差分特征可表示为

$$x_{JM}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_J(\tau) w_M(t - \tau) h(t - \tau) d\tau = \sum_{n_1=1}^{N_R} \sum_{n_2=0}^{N_S-1} \sum_{m=0}^{M-1} A_J c_M(m) \exp(j\varphi_J(t)) \cdot \int_{t+mT_C}^{t+(m+1)T_C} \text{rect}\left(\frac{\tau - \tau_S - n_1 T_J - n_2 T_S}{T_J}\right) \exp(j2\pi k(t - \tau_S - n_1 T_J - n_2 T_S)\tau) d\tau \quad (19)$$

其中

$$\varphi_J(t) = 2\pi f_0(t - \tau_S - n_1 T_J - n_2 T_S) - \pi k(t - \tau_S - n_1 T_J - n_2 T_S)(t + \tau_S + n_1 T_J + n_2 T_S) \quad (20)$$

在干扰位置处有

$$x_{JM}(\tau_S + n_1 T_J + n_2 T_S) = \sum_{m=0}^{M-1} A_J c_M(m) \int_{\tau_S+n_1 T_J+n_2 T_S+mT_C}^{\tau_S+n_1 T_J+n_2 T_S+(m+1)T_C} \text{rect}\left(\frac{\tau - \tau_S - n_1 T_J - n_2 T_S}{T_J}\right) d\tau \quad (21)$$

式(21)的取值与切片位置、切片脉宽有关, 一般情况下,  $x_{JM}(\tau_S + n_1 T_J + n_2 T_S) \neq 0$ 。

以干扰机对发射信号的前1/6段进行采样、转发为例, 目标回波和干扰的第1至4阶差分特征如图2所示。可见对于目标回波, 除匹配滤波结果外, 采用上述方法得到的其他阶差分特征 $x_{TM}(t)$ ,  $M \neq 1$ 都在目标位置处存在一个幅度相比于附近位置较低的凹口; 对于干扰信号则不存在这种现象, 目标回波和干扰信号在差分特征空间中表现出显著的差异。

### 2.3 判决准则

常规雷达将匹配滤波结果通过平方律检波器后, 与门限 $\gamma$ 比较进行目标检测, 判决准则如式(22)所示:

$$y_1(t) = |x_1(t)|^2 \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \gamma \quad (22)$$

其中,  $H_1$ 表示存在目标,  $H_0$ 表示仅存在噪声。判决结果可表示为

$$r_1(t) = \begin{cases} 1, & y_1(t) > \gamma \\ 0, & y_1(t) \leq \gamma \end{cases} \quad (23)$$

检测门限 $\gamma$ 由仅存在噪声时 $y_1(t)$ 的分布和常规雷达虚警概率决定。由于第1阶差分特征 $x_1(t)$ 不能体现目标回波与干扰信号差异, 上述判决方法仅能在无干扰的情况下检测目标, 在有干扰的情况下则会出现大量虚警。

为充分利用目标回波和干扰在差分特征空间的差异, 有效抑制干扰造成的虚警, 提升雷达在干扰条件下的检测性能, 本文提出用如下新的判决准则

代替常规雷达目标检测方法:

$$r(t) = r_1(t)r_2(t) = \begin{cases} 1, & \text{判为存在目标} \\ 0, & \text{判为不存在目标} \end{cases} \quad (24)$$

其中,  $r_1(t)$ 是式(23)定义的常规雷达目标检测方法的判决结果,  $r_2(t)$ 是对过常规检测门限 $\gamma$ 的备选信源的辨识结果, 辨识方法如式(25)所示:

$$r_2(t) = R(t) > \epsilon = \begin{cases} 1, & \text{判为目标} \\ 0, & \text{判为干扰} \end{cases} \quad (25)$$

其中,  $R(t)$ 构造为第1阶差分特征的能量与其他2阶至 $M_{\max}$ 阶差分特征的能量积累结果之比, 如式(26)所示:

$$R(t) = \frac{|x_1(t)|^2}{\sum_{M=2}^{M_{\max}} |x_M(t)|^2} \quad (26)$$

门限 $\epsilon$ 可根据最小错误概率准则<sup>[22]</sup>, 由目标、干扰处 $R(t)$ 的分布决定。由2.2节理论分析可知, 若不考虑干扰, 目标处的第2阶至 $M_{\max}$ 阶差分特征的数学期望为0, 仅表现为噪声, 差分特征的能量积累结果接近为0, 差分特征能量比值 $R(t)$ 在目标处出现很高的尖峰。对于干扰信号, 其恰好与差分匹配滤波器正交的概率极低, 此类事件可以忽略, 因此干扰处的第2阶至 $M_{\max}$ 阶差分特征与干扰比强相关, 即干扰信号越强, 差分特征越大, 干扰的高阶差分特征能量积累结果与第1阶匹配滤波结果的能量随干扰比同步提高。因此差分特征能量比值 $R(t)$ 在干扰处的响应不高, 与其在目标处的响应差异显著。值得一提的是, 上述针对干扰的分析亦适用于多个干扰时域重叠的场景, 该方法在多干扰场景下仍然有效。

综上所述, 本文提出的间歇采样转发干扰场景下的目标检测方法流程图如图3所示。

2.4 性能指标

将雷达回波信号在匹配滤波、平方律检波后的结果  $y_1(t)$  在纯噪声、目标、干扰处的概率密度函数分别记作  $f_0(y)$ ,  $f_T(y)$ ,  $f_J(y)$ ; 差分特征能量比值  $R(t)$  在纯噪声、目标、干扰处的概率密度函数分别

记作  $g_0(y)$ ,  $g_T(y)$ ,  $g_J(y)$ 。将噪声、干扰判决为目标会发生虚警, 虚警概率可表示为

$$P_{FA} = \int_{\gamma}^{\infty} f_0(y) dy \int_{\epsilon}^{\infty} g_0(r) dr + \int_{\gamma}^{\infty} f_J(y) dy \int_{\epsilon}^{\infty} g_J(r) dr \quad (27)$$

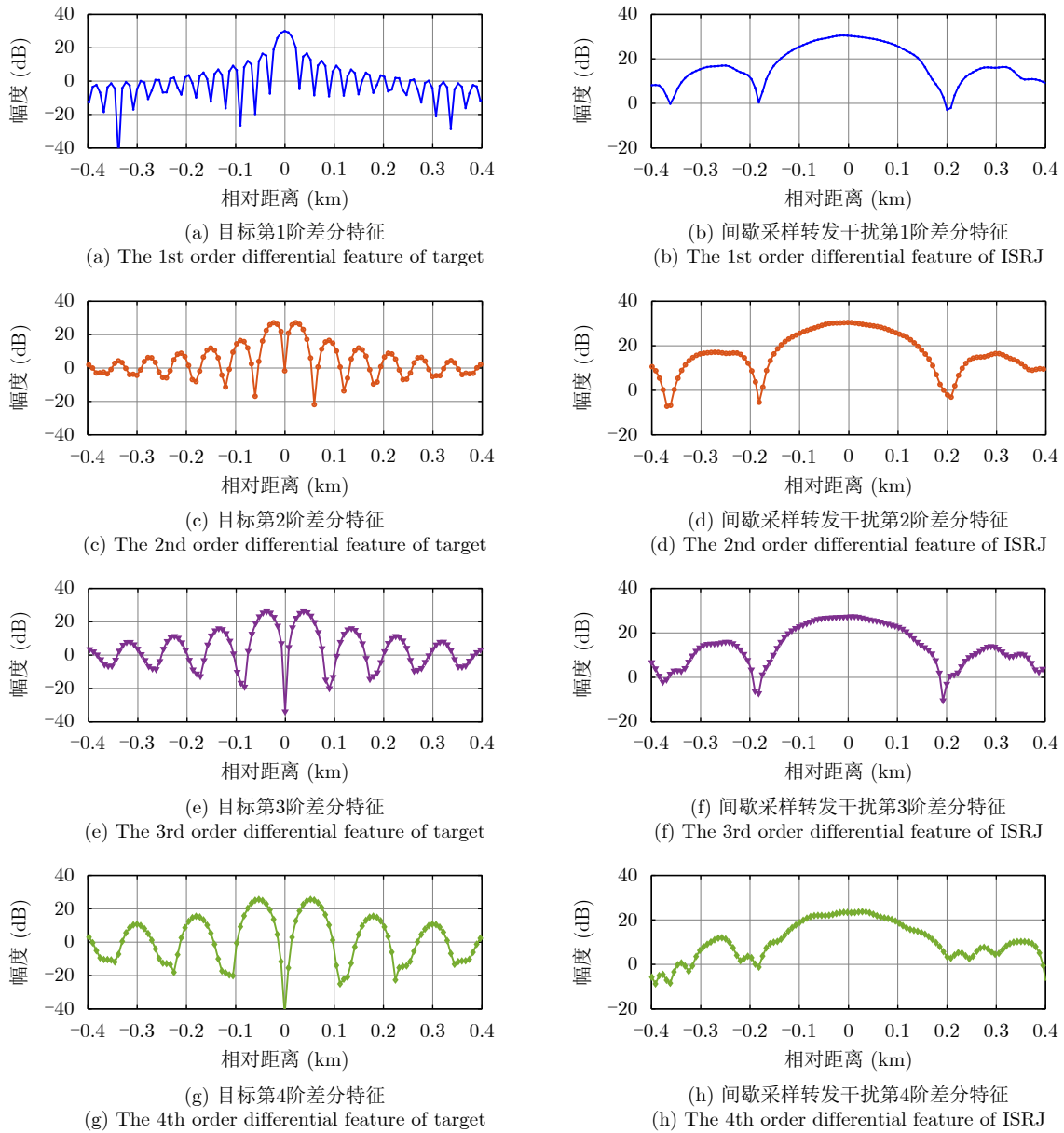


图 2 目标与间歇采样转发干扰差分特征对比

Fig. 2 Comparison of the differential features between target and ISRJ

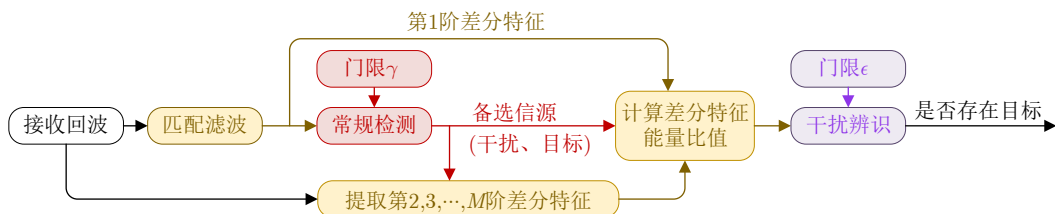


图 3 基于差分特征的间歇采样转发干扰辨识与抑制流程图

Fig. 3 Flow chart of the ISRJ identification and suppression based on differential features

检测概率可表示为

$$P_D = \int_{\gamma}^{\infty} f_T(y) dy \int_{\epsilon}^{\infty} g_T(r) dr \quad (28)$$

### 3 仿真结果与性能分析

#### 3.1 基于仿真数据的性能分析

##### 3.1.1 参数设置

本文考虑如下仿真场景：雷达接收信号中存在一个目标、两组间歇采样转发干扰，噪声为零均值复高斯白噪声。仿真数据信源参数如表2所示。

仿真设置常规雷达检测的虚警概率为 $10^{-6}$ ，噪声功率归一化后，平方律检波器的输出服从参数为1的指数分布，对应检测门限 $\gamma$ 为13.82。将最高差分阶数 $M_{max}$ 设为6，在各干噪比、信噪比下分别做 $10^4$ 次蒙特卡罗仿真，统计 $R(t)$ 的分布，结果如图4所示，可见：在干扰、目标处， $R(t)$ 的取值有明显差异，且信噪比越大，两者差异越大。

下面考虑用统计方法获得辨识门限 $\epsilon$ 。首先统计表2给出的所有干噪比、信噪比下干扰、目标两类样本处 $R(t)$ 的分布，如图5(a)所示。然后计算两类辨识错误(干扰辨识为目标、目标辨识为干扰)概

表 2 仿真数据信源参数

Tab. 2 Source parameters for simulation data

信源	波形参数	脉压后信(干)噪比
目标	脉宽100 $\mu$ s, 带宽5 MHz	10~50 dB, 间隔1 dB
干扰1	切片宽度16.67 $\mu$ s, 切片1次重复转发5次	10~50 dB, 间隔1 dB
干扰2	切片宽度10 $\mu$ s, 切片1次立即重复转发2次, 共切片3次	10~50 dB, 间隔1 dB

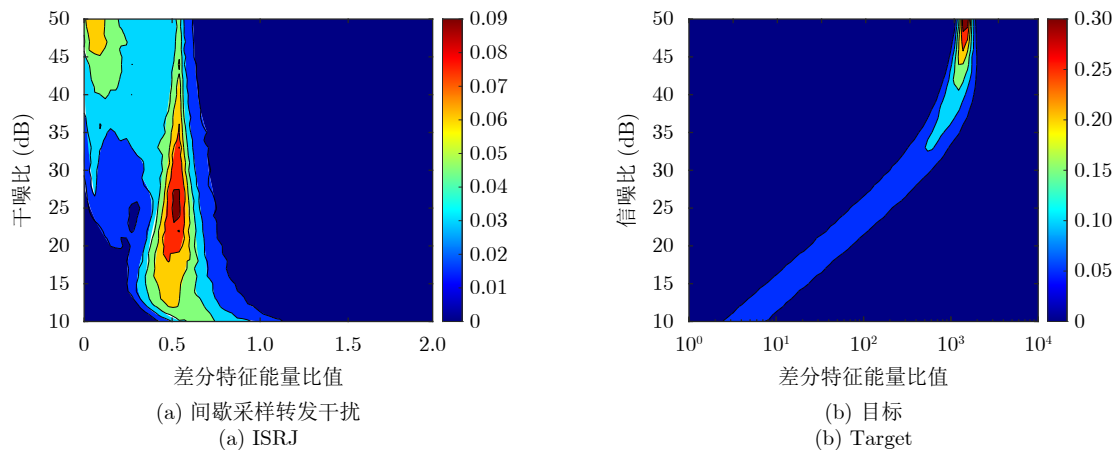


图 4 不同干噪比、信噪比下，干扰、目标处差分特征能量比值的概率分布

Fig. 4 The probability distribution of differential features energy ratio under different jamming-to-noise ratio and signal-to-noise ratio for ISRJ and target

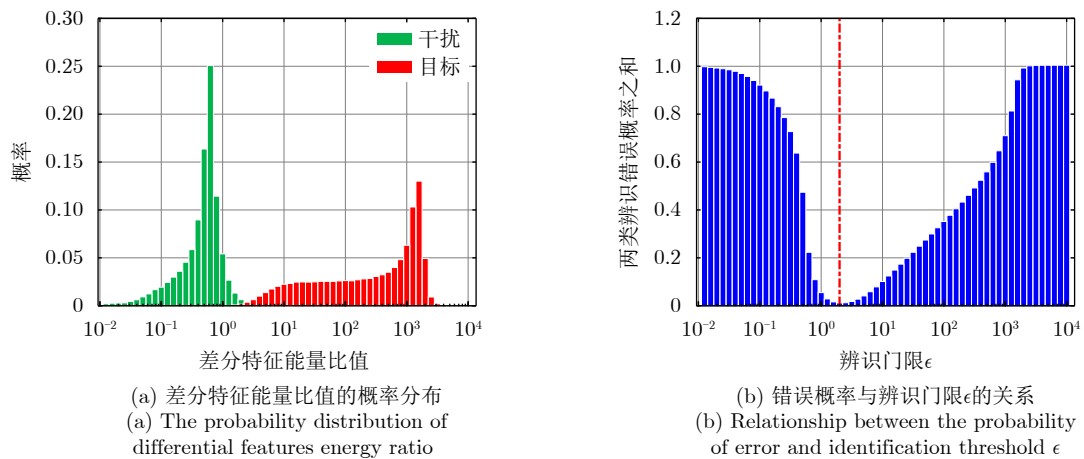


图 5 由最小错误概率准则确定辨识门限 $\epsilon$

Fig. 5 The determination of identification threshold  $\epsilon$  by minimizing the probability of error

率之和与辨识门限 $\epsilon$ 的关系,如图5(b)。由最小错误概率准则设置辨识门限 $\epsilon$ 为1.79,此时干扰被判决为目标的概率小于0.67%,目标被判决为干扰的概率小于0.19%。

综上所述,设置仿真参数如表3所示。

### 3.1.2 特征提取

设置脉压后信噪比为25 dB,干噪比为30 dB;目标出现在26 km处,两干扰出现在20~30 km处。雷达接收信号各分量匹配滤波结果(即一维距

离像)如图6(a)所示,目标、干扰均可过常规检测门限 $\gamma$ 被判决为待辨识的备选信源。提取差分特征并计算辨识所用的差分特征能量比值 $R(t)$ ,如图6(b)所示,可见 $R(t)$ 在目标处出现很高的尖峰,在干扰处的响应相对较低,干扰得以有效辨识与抑制。

### 3.1.3 检测性能分析

在无干扰场景下,遍历雷达接收信号的信噪比,在各信噪比下做500次蒙特卡罗仿真,所提方法与常规检测方法的检测性能曲线如图7(a)所示,可见两者近似重合,辨识门限几乎不影响目标的检测性能。在干扰场景下,遍历雷达接收信号的信噪比、干噪比,在各信噪比、干噪比下分别做500次蒙特卡罗仿真,所提方法的检测概率如图7(b)所示。在不同干噪比下,为达到95%的检测概率,所需的信噪比如表4所示。当干噪比小于25 dB时,所提方法在当前仿真场景下的检测性能几乎无损失;

表 3 仿真参数

Tab. 3 Simulation parameters

参数	数值
常规检测门限	13.82
最高差分阶数	6
辨识门限	1.79

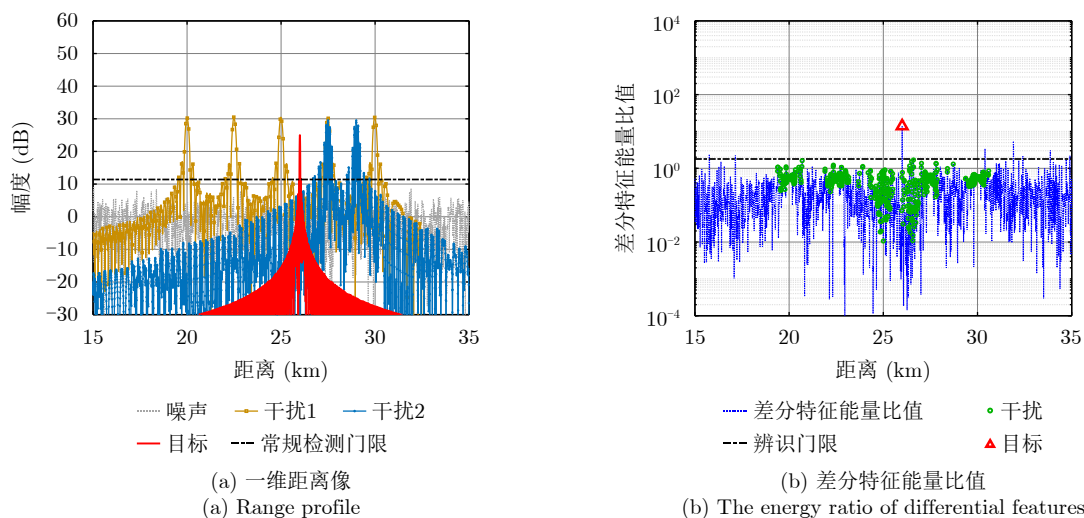


图 6 仿真数据间歇采样转发干扰辨识与抑制结果

Fig. 6 ISRJ identification and suppression results for simulation data

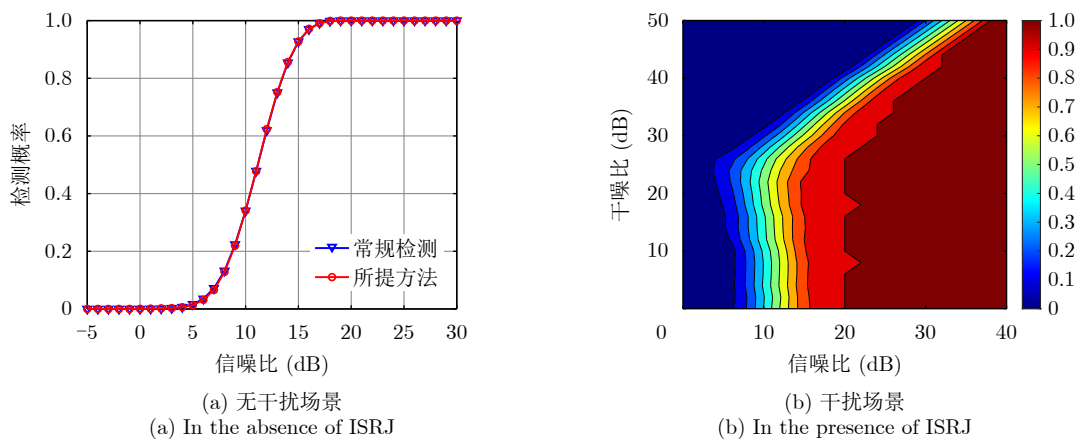


图 7 目标检测概率

Fig. 7 Target detection probability

当干噪比大于25 dB时, 所提方法的检测性能存在一定的损失但仍有可能检测到高信噪比的目标。

假设目标位置已知, 仅考虑干扰抑制对目标检测性能的影响, 将本文所提方法与文献[19]的方法一、文献[20]、文献[21]这3种典型的时频域滤波算法进行对比仿真, 将这3种方法分别简称为Dechirp-STFT (Short-Time Fourier Transform), max-TF (Time-Frequency), PC-STFT (Pulse Compression-STFT)。设置脉压后干噪比为30 dB, 其他仿真参数与无干扰场景相同, 短时傅里叶变换窗长为6.4  $\mu\text{s}$ , 滑窗步进为0.05  $\mu\text{s}$ 。4种方法在目标处的检测性能如图8所示。可见在当前仿真场景下, 为达到95%的检测概率, 本文所提方法相比于3种典型的时频域滤波算法所需的信噪比至少改善4.2 dB。

### 3.2 基于实测数据的性能分析

#### 3.2.1 参数设置

在间歇采样转发干扰场景下, 采集实测数据, 具体信源参数如表5所示。

为便于分析, 关闭干扰机, 采集纯目标回波数

表 4 不同干噪比下, 检测概率为95%时所需的信噪比

Tab. 4 When the detection probability is 95%, the required signal-to-noise ratios under different jamming-to-noise ratios

干噪比(dB)	所需信噪比(dB)
无干扰	15.5
10	17.9
20	17.4
30	21.4
40	29.5
50	38.5

据, 作为干扰场景下实测数据的目标分量。仿真设置最高差分阶数 $M_{\text{max}}$ 为3, 辨识门限 $\epsilon$ 为3, 其他参数与3.1节相同, 此时干扰被辨识为目标的错误概率为0.28%。

#### 3.2.2 特征提取

实测数据及其目标分量的一维距离像如图9(a)所示, 目标几乎被干扰淹没。用本文所提方法提取信号差分特征并计算差分特征能量比值 $R(t)$ 如图9(b)

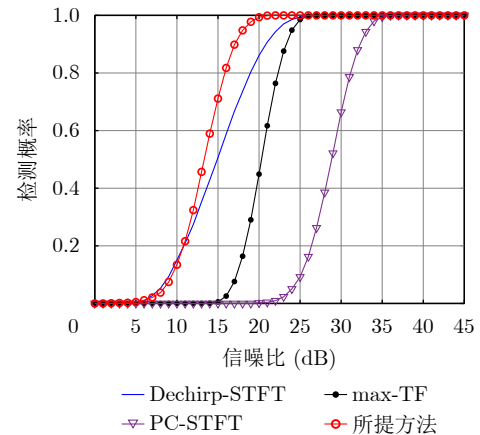


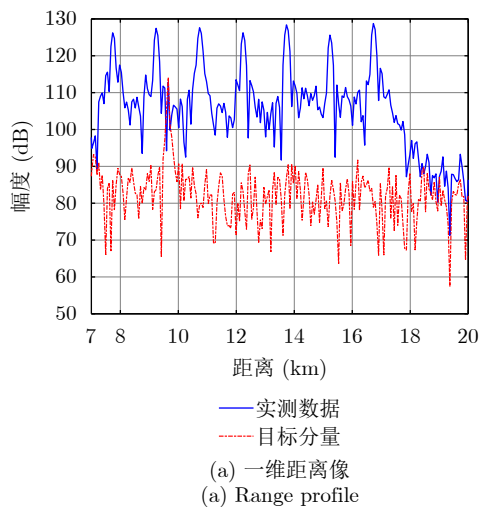
图 8 4种方法检测性能对比(仿真数据)

Fig. 8 The detection performance comparison of the four methods (simulation data)

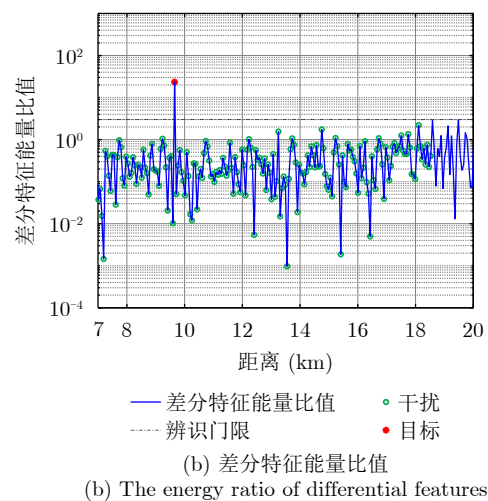
表 5 实测数据信源参数

Tab. 5 Source parameters for measured data

目标参数	数值	干扰参数	数值
脉宽( $\mu\text{s}$ )	20	脉宽( $\mu\text{s}$ )	10
带宽(MHz)	2	带宽(MHz)	1
脉压后信噪比(dB)	33	脉压后信噪比(dB)	45



(a) 一维距离像  
(a) Range profile



(b) 差分特征能量比值  
(b) The energy ratio of differential features

图 9 实测数据间歇采样转发干扰辨识与抑制结果

Fig. 9 ISRJ identification and suppression results for measured data



所示, 可见 $R(t)$ 在干扰处的响应明显低于目标, 目标得以显露。

3种典型的时频域滤波算法Dechirp-STFT<sup>[19]</sup>, max-TF<sup>[20]</sup>, PC-STFT<sup>[21]</sup>对去斜后的回波信号或一维距离像做时频分析, 然后由目标、干扰时频分布特征差异构造滤波器以抑制干扰。实测数据及其目标分量的时频图、去斜后信号时频图、一维距离

像时频图如图10所示。由图10(b)和图10(e)可见, 干扰信号在时域将目标回波完全覆盖, 从时频图中无法提取纯目标片段构造滤波器, Dechirp-STFT和max-TF方法失效; 由图10(c)和图10(f), 实测数据干扰能量较强且时频图精度低(采样率为2.5 MHz), 导致目标与干扰粘连而难以分辨, PC-STFT方法失效。

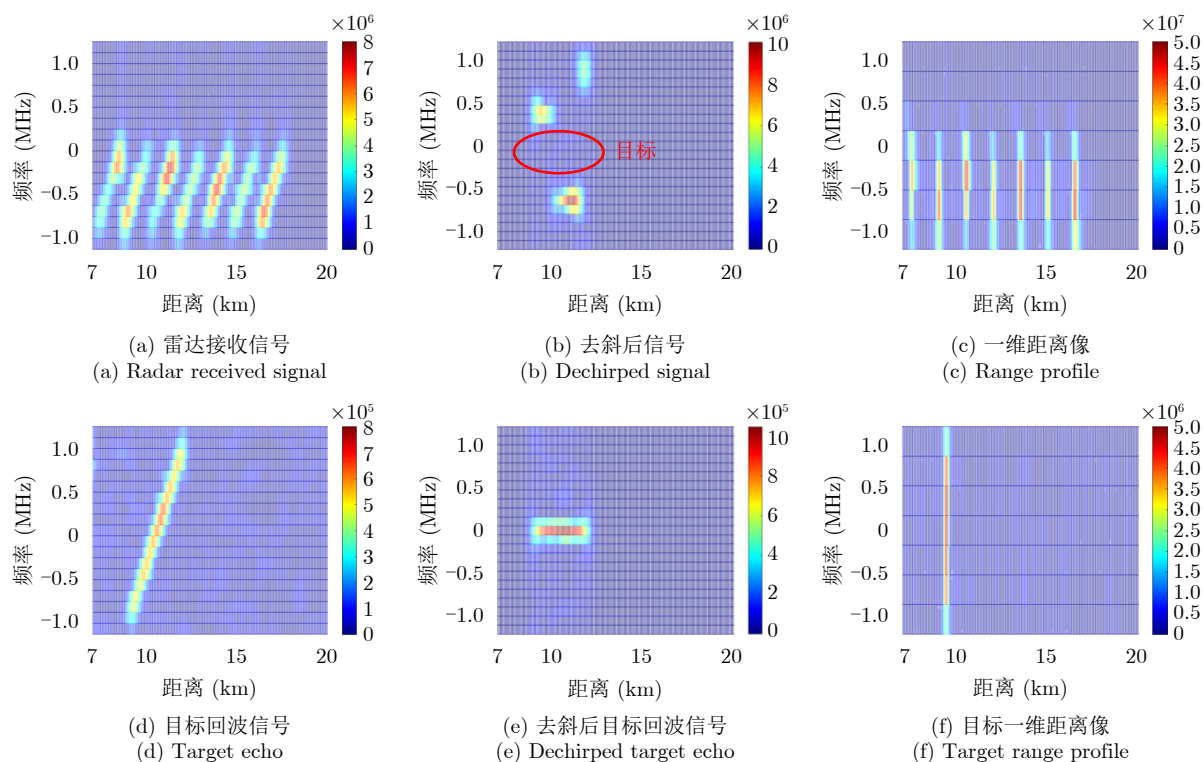


图 10 时频图

Fig. 10 Time-Frequency distribution

## 4 结语

本文提出了一种信号差分特征提取方法, 利用目标回波、间歇采样转发干扰信号在差分特征空间上的显著差异, 以第1阶差分特征与其他阶差分特征总能量之比为统计量, 设计判决准则以实现干扰辨识、抑制以及干扰场景下的目标检测。由于难以解析求得目标、干扰处差分特征能量之比分布, 本文亦给出了用统计方法设置辨识门限的仿真结果。本文仿真验证了雷达回波信号差分特征能量之比可在目标处出现很高的尖峰, 而在干扰处其响应相对较低, 利用该差异可使干扰得以有效辨识与抑制。在无干扰场景下, 所提方法与常规检测方法的检测性能曲线近似重合; 在干扰场景下, 仿真结果表明所提方法相比于目前已有的3种典型时频域滤波算法具有更好的目标检测性能。

## 参考文献

- [1] 王雪松, 刘建成, 张文明, 等. 间歇采样转发干扰的数学原理[J]. 中国科学E辑, 2006, 36(8): 891-901. doi: 10.3969/j.issn.1674-7259.2006.08.007.  
WANG Xuesong, LIU Jiancheng, ZHANG Wenming, et al. Mathematic principles of interrupted-sampling repeater jamming (ISRJ)[J]. *Science in China Series E: Information Sciences*, 2006, 36(8): 891-901. doi: 10.3969/j.issn.1674-7259.2006.08.007.
- [2] 刘忠, 王雪松, 刘建成, 等. 基于数字射频存储器的间歇采样重复转发干扰[J]. 兵工学报, 2008, 29(4): 405-410. doi: 10.3321/j.issn:1000-1093.2008.04.005.  
LIU Zhong, WANG Xuesong, LIU Jiancheng, et al. Jamming technique of interrupted-sampling and periodic repeater based on digital radio frequency memory[J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(4): 405-410. doi: 10.3321/j.issn:

- 1000-1093.2008.04.005.
- [3] GRECO M, GINI F, and FARINA A. Radar detection and classification of jamming signals belonging to a cone class[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(5): 1984–1993. doi: [10.1109/TSP.2007.909326](https://doi.org/10.1109/TSP.2007.909326).
- [4] 李宏, 郑光勇, 杨英科, 等. 部分截取雷达信号多假目标干扰性能分析[J]. *电子信息对抗技术*, 2010, 25(3): 39–44. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2010.03.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2010.03.010).  
LI Hong, ZHENG Guangyong, YANG Yingke, *et al.* The performance analysis of multi-false targets jamming of part copying radar pulse[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2010, 25(3): 39–44. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2010.03.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2010.03.010).
- [5] ZHANG Jindong, ZHU Daiyin, and ZHANG Gong. New antivelocety deception jamming technique using pulses with adaptive initial phases[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(2): 1290–1300. doi: [10.1109/TAES.2013.6494414](https://doi.org/10.1109/TAES.2013.6494414).
- [6] 李宏, 牟能文, 郭雷. 相参干扰的压制距离[J]. *电子信息对抗技术*, 2015, 30(4): 33–36. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2015.04.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2015.04.008).  
LI Hong, MOU Nengwen, and GUO Lei. Depressing distance of coherent jamming[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2015, 30(4): 33–36. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2015.04.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2015.04.008).
- [7] 施富强, 周超, 刘泉华. 间歇采样重复转发式干扰特性分析[J]. *信号处理*, 2017, 33(12): 1616–1624. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2017.12.013](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2017.12.013).  
SHI Fuqiang, ZHOU Chao, and LIU Quanhua. Characteristics analysis of interrupted-sampling repeater jamming[J]. *Journal of Signal Processing*, 2017, 33(12): 1616–1624. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2017.12.013](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2017.12.013).
- [8] 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).
- [9] CHEN Fengbo, LI Rongfeng, DING Liming, *et al.* A method against DRFM dense false target jamming based on jamming recognition[C]. IET International Radar Conference 2015, Hangzhou, China, 2015: 1–4. doi: [10.1049/cp.2015.1225](https://doi.org/10.1049/cp.2015.1225).
- [10] 陈静, 李晗, 张洪纲, 等. 分布式雷达主瓣间歇采样转发干扰抑制方法[J]. *信号处理*, 2018, 34(11): 1368–1376. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2018.11.013](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2018.11.013).  
CHEN Jing, LI Han, ZHANG Honggang, *et al.* Main-lobe interrupted sampling repeater jamming suppression method in distributed radar[J]. *Journal of Signal Processing*, 2018, 34(11): 1368–1376. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2018.11.013](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2018.11.013).
- [11] 周畅, 汤子跃, 余方利, 等. 基于脉内正交的抗间歇采样转发干扰方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2017, 39(2): 269–276. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.02.06](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.02.06).  
ZHOU Chang, TANG Ziyue, YU Fangli, *et al.* Anti intermittent sampling repeater jamming method based on intrapulse orthogonality[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(2): 269–276. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.02.06](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.02.06).
- [12] ZHANG Jiaxiang and ZHOU Chao. Interrupted sampling repeater jamming suppression method based on hybrid modulated radar signal[C]. 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP), Chongqing, China, 2019: 1–4. doi: [10.1109/ICSIDP47821.2019.9173093](https://doi.org/10.1109/ICSIDP47821.2019.9173093).
- [13] 周畅, 汤子跃, 朱振波, 等. 抗间歇采样转发干扰的波形设计方法[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(9): 2198–2205. doi: [10.11999/JEIT171236](https://doi.org/10.11999/JEIT171236).  
ZHOU Chang, TANG Ziyue, ZHU Zhenbo, *et al.* Anti-interrupted sampling repeater jamming waveform design method[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(9): 2198–2205. doi: [10.11999/JEIT171236](https://doi.org/10.11999/JEIT171236).
- [14] ZHANG Yang, WEI Yinsheng, and YU Lei. Interrupted sampling repeater jamming recognition and suppression based on phase-coded signal processing[J]. *Signal Processing*, 2022, 198: 108596. doi: [10.1016/j.sigpro.2022.108596](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2022.108596).
- [15] ZHOU Kai, LI Dexin, SU Yi, *et al.* Joint design of transmit waveform and mismatch filter in the presence of interrupted sampling repeater jamming[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2020, 27: 1610–1614. doi: [10.1109/LSP.2020.3021667](https://doi.org/10.1109/LSP.2020.3021667).
- [16] TIAN Dezhi, REN Wei, ZHANG Lu, *et al.* An adaptive scheme for chopping and interleaving jamming suppression based on the mismatched filter[C]. 2021 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS), Xi'an, China, 2021: 78–83. doi: [10.1109/ICCAIS52680.2021.9624638](https://doi.org/10.1109/ICCAIS52680.2021.9624638).
- [17] ZHOU Kai, LI Dexin, QUAN Sinong, *et al.* SAR Waveform and mismatched filter design for countering interrupted-sampling repeater jamming[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 5214514. doi: [10.1109/TGRS.2021.3107328](https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3107328).
- [18] ZHOU Chao, LIU Quanhua, and CHEN Xinliang. Parameter estimation and suppression for DRFM-based interrupted sampling repeater jammer[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(1): 56–63. doi: [10.1049/iet-rsn.2017.0114](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0114).
- [19] GONG Shixian, WEI Xizhang, and LI Xiang. ECCM scheme against interrupted sampling repeater jammer based on time-frequency analysis[J]. *Journal of Systems*

- Engineering and Electronics*, 2014, 25(6): 996–1003. doi: [10.1109/JSEE.2014.00114](https://doi.org/10.1109/JSEE.2014.00114).
- [20] CHEN Jian, WU Wenzhen, XU Shiyu, *et al.* Band pass filter design against interrupted-sampling repeater jamming based on time-frequency analysis[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2019, 13(10): 1646–1654. doi: [10.1049/iet-rsn.2018.5658](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2018.5658).
- [21] 周超, 刘泉华, 胡程. 间歇采样转发式干扰的时频域辨识与抑制[J]. 雷达学报, 2019, 8(1): 100–106. doi: [10.12000/JR18080](https://doi.org/10.12000/JR18080).
- ZHOU Chao, LIU Quanhua, and HU Cheng. Time-frequency analysis techniques for recognition and suppression of interrupted sampling repeater jamming[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(1): 100–106. doi: [10.12000/JR18080](https://doi.org/10.12000/JR18080).
- [22] KAY S M. *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory Volume II*[M]. Englewood: Prentice-Hall, Inc., 1998: 77–79.

### 作者简介

盖季妤, 硕士生, 主要研究方向为干扰辨识与抑制、自适应阵列信号处理、扩展目标检测。

姜 维, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为阵列信号处理、雷达信号处理。

张凯翔, 博士生, 主要研究方向为分布式阵列雷达抗干扰。

梁振楠, 博士, 主要研究方向为数字阵列雷达系统和宽带雷达信号处理。

陈新亮, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为自适应阵列信号处理、双/多基地合成孔径雷达成像。

刘泉华, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高分辨雷达、分布式雷达系统及信号处理。

(责任编辑: 于青)