

基于脉内步进 LFM 时频分析的 抗间歇采样干扰方法

张建中^{1,2}, 穆贺强¹, 文树梁¹, 李彦兵¹

(1. 北京无线电测量研究所, 北京 100854; 2. 中国航天科工集团 第二研究院, 北京 100854)

摘要: 在深入研究抗间歇采样干扰的基础上, 针对其时域不连续转发与时域不连续采样两个特点, 提出一种基于脉内步进线性调频(LFM)时频分析的抗间歇采样干扰方法. 该方法利用脉内步进 LFM 子脉冲之间的正交性互相掩护, 通过短时傅里叶变换, 将时频矩阵在时间维投影, 提取干扰不连续转发段信号, 并以该段信号最大值为门限, 对时频矩阵进行干扰抑制, 抑制后时频矩阵通过逆短时傅里叶变换, 得到时域信号, 并用于目标检测. 理论推导和仿真结果表明, 该方法可以有效抑制不同样式的间歇采样干扰, 最大限度提取不受干扰信号.

关键词: 间歇采样; 脉内步进; 时频分析; 抗干扰方法

中图分类号: TN974 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0645(2020)05-0543-09

DOI: 10.15918/j.tbit.1001-0645.2018.202

Anti-Intermittent Sampling Repeater Jamming Method Based on Stepped LFM Joint Time-Frequency Analysis

ZHANG Jian-zhong^{1,2}, MU He-qiang¹, WEN Shu-liang¹, LI Yan-bing¹

(1. Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China;

(2. The Second Academy of China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100854, China)

Abstract: Analyzing the principles of the ISRJ and the characteristics of the discontinuous retransmission and sampling of ISRJ in time domain, an anti ISRJ method based on stepped LFM joint time-frequency analysis (JTFA) was proposed. This method was designed to utilize the sub pulses' orthogonality to cover each other, to extract the discontinuous retransmission signal segment with short time Fourier (STFT) in time domain, and taking the maximum signal of this segment as threshold to process the interferences suppression in time-frequency matrix. Through inverse STFT, the time domain signal could be obtained for target detection. Theoretical analysis and experimental results show this method can carry out anti ISRJ with different patterns, maximize the undisturbed signal.

Key words: intermittent sampling; intra pulse stepped; joint time-frequency analysis; anti jamming method

近年来,“干扰”与“抗干扰”这对天生的矛盾愈演愈烈,尤其是在 DRFM(digital radio frequency memory,DRFM)相干干扰技术^[1-2]迅速发展的情形下,新的干扰样式层出不穷,对主瓣干扰背景下的雷

达信号检测提出严峻挑战. 基于 DRFM 的间歇采样干扰^[3-5]可快速、精准地复制探测波形,在时域、频域覆盖真实目标回波,并且在脉压域也可形成多假目标或压制干扰带,常规的随机相位编码^[6-7]、脉间

收稿日期: 2019-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61271417)

作者简介: 张建中(1985—),男,博士生,E-mail:zhang.jianzhong@163.com.

波形捷变^[8-9]、掩护脉冲^[10]已无法有效对抗。

目前,公开发表的对抗间歇采样干扰方法^[11-12]并不多。其中,杨少奇等^[12]提出基于时频分析的间歇采样干扰识别与抑制算法,通过时频分析后在时间维分段搜索能量的极小值点设计合适的带通滤波器,对时频变换后的信号进行滤波,从而消除干扰,其本质利用了干扰在时域的不连续转发特点,对于类似重复转发干扰的高占空比干扰抑制效果较差。毛二等^[13]提出利用合成宽带信号实现高精度测距测速和微动测量,受其启发,将多周期脉冲内频率步进信号的合成宽带信号应用于对抗干扰。从而提出基于脉内步进 LFM 时频分析的抗间歇采样干扰方法。

本文阐述了间歇采样不同样式转发干扰的原理和特点,分析雷达信号、干扰信号、目标回波之间的差异,进而分析实施有效对抗的可能;接着针对干扰时域不连续转发与时域不连续采样特点,提出脉内步进 LFM 信号用于对抗干扰的必要;然后结合合成宽带波形和干扰特性,通过短时傅里叶(short-time Fourier transform, STFT)变换进行时频分析,将 STFT 变换后的二维信号投影到时间维,在时间维提取干扰不连续转发信号段,以该段信号最大值为门限,对时频矩阵进行干扰抑制,抑制后时频矩阵通过逆短时傅里叶变换,得到时域信号。最后通过时频分析干扰抑制效果仿真,分析基于脉内步进 LFM 时频分析抗间歇采样干扰方法(该方法)的有效性。

1 间歇采样转发干扰分析

根据间歇干扰的转发次数,间歇干扰以直接转发和重复转发为代表,如图 1 所示。在此两种基本样式基础上又衍生出其他样式^[14-16],如叠加转发、噪声调制转发等。不同参数组合和转发样式可以在时、频、脉域造成不同干扰效果,干扰机可根据应用场合灵活设置。

对间歇采样转发信号窄带噪声调制也称灵巧干扰,其不仅可以提高假目标数或造成压制效果,也可以提高频谱的覆盖率。假设噪声调制采用噪声调频信号,噪声调频信号用噪声对射频信号进行频率调制产生,表示为

$$S_{FM}(t) = \exp[j2\pi K_{FM} \int_0^t u(t') dt' + \varphi_0]. \quad (1)$$

式中:调频噪声信号 $u(t')$ 为一个零均值的广义平稳

随机过程; K_{FM} 为调频系数;初始相位 φ_0 服从 $[0, 2\pi]$ 均匀分布。

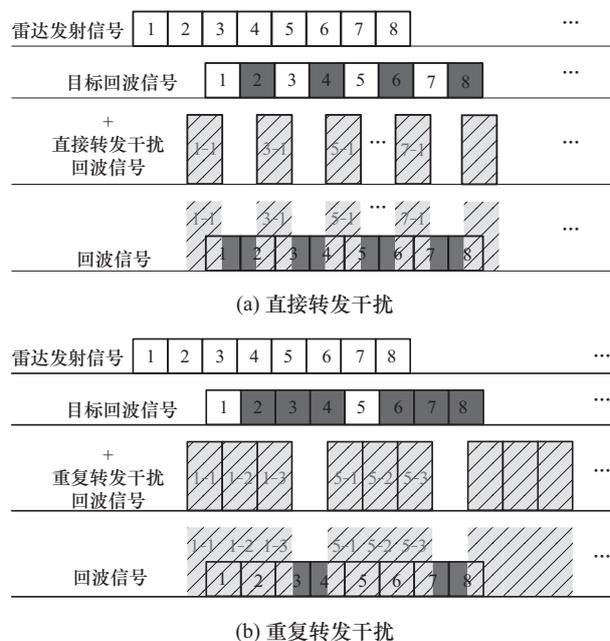


图 1 间歇采样转发干扰基本样式

Fig. 1 Intermittent sampling repeater jamming patterns

假设进入干扰设备的雷达信号为 $x(t)$, 直接转发采样信号为 $p(t)$, 则噪声调制直接转发干扰可表示为

$$S_D(t) = S_{FM}(t)x(t)p(t - \tau_c - \tau) = \exp[j2\pi K_{FM} \int_0^t u(t') dt' + \varphi_0] \times$$

$$x(t) \left[\text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \otimes \sum_{n=0}^{N-1} \delta(t - \tau_c - \tau - nT_s) \right]. \quad (2)$$

式中: \otimes 代表卷积, 总脉冲数 $N = \lceil T/T_s \rceil$; T 为 LFM 脉冲持续时间; τ_c 为干扰机采样延迟; τ 为干扰机采样宽度; T_s 为脉冲重复周期。直接转发干扰为实时侦测雷达发射信号, 一般干扰机开窗时间 τ/T_s 约等于 50%, 即干扰信号的占空比也约等于 50%, 且 τ 一般不会过大。

假设重复转发采样信号为 $p'(t)$, 则重复转发干扰可表示为

$$S_R(t) = S_{FM}(t)x(t)p'(t - \tau_c - t_r) \otimes$$

$$\sum_{k=1}^K \delta(t - kt_r) = \exp[j2\pi K_{FM} \int_0^t u(t') dt' + \varphi_0] \times \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{N'-1} x(t) \left[\text{rect}\left(\frac{t}{t_r}\right) \otimes \delta(t - \tau_c - t_r - nT_r) \right] \times \delta(t - kt_r). \quad (3)$$

式中: 转发次数 $K = \lceil t_r/T_r \rceil - 1$; 总脉冲数 $N' = \lceil T/T_r \rceil$; t_r 为干扰机采样宽度; T_r 为脉冲重复周期。重复转发干扰增加了干扰时域占空比, 同时也可以

增多假目标数,但牺牲了对雷达信号的采样实时性,假目标能量相对直接转发也存在损失。

通过对间歇采样转发干扰的原理分析,间歇采样干扰信号在时域、频域、脉压域都可以对目标形成有效干扰,单独从某一域很难有效进行干扰对抗,调制

直接转发、重复转发脉压(pulse compression, PC)输出仿真图如图 2 所示,可以看出在脉压域形成压制干扰。但间歇采样干扰信号与目标信号有两个明显区别,一是在时域上不连续转发,即图 1 中灰色区域没有干扰;二是在时域不连续采样,即图 1 中黑色区域。

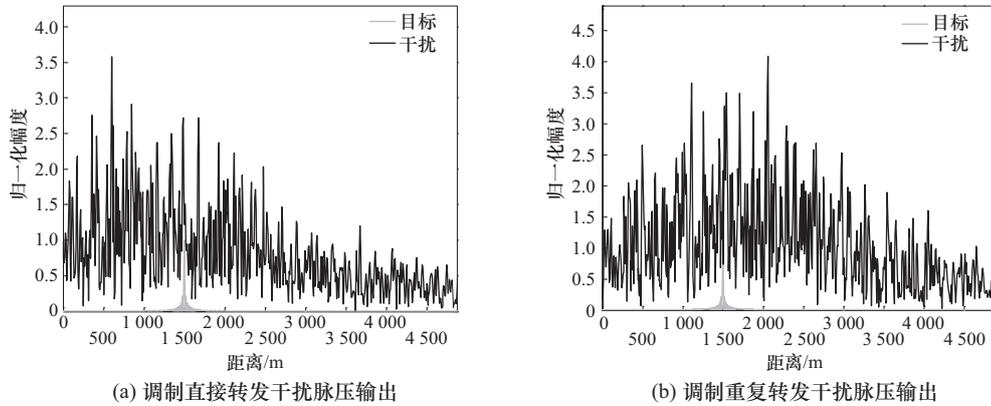


图 2 不同干扰样式脉压输出仿真图
Fig. 2 PC output of different pattern jamming

2 脉内步进 LFM 波形抗干扰算法

通过对间歇采样转发干扰分析,对抗间歇采样干扰主要在于两段无干扰信号的提取,其中时域不连续转发信号段可在时间维提取;时域不连续采样信号段可在频率维提取,但由于干扰信号在频域存在旁瓣电平,因此很难直接在频率维提取。时频分析能同时提供时间维与频率维的联合分布信息,适用于分析干扰和目标信号时间频率之间的对应关系。文中,应用时频分析可以克服频域提取干扰旁瓣与过渡带的影响;也可以同时提取干扰不连续转发和不连续采样两段信号;还可以利用时频分析的“聚焦”效应,减小噪声起伏对提取门限的影响。

2.1 信号时频分析

时频分析^[17-18]作为一种新兴的信号处理方法,受到越来越多的重视。基本的时频分析方法有 STFT、Wigner-Ville 分布、小波变换等。其中,STFT 满足线性叠加性,各分量之间不存在交叉性,因此选 STFT 对接收信号进行时频分析。STFT 变换的定义为

$$STFT_s(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t')g^*(t' - t) \times \exp(-j2\pi ft')dt'. \quad (4)$$

其中 $g(t)$ 为窗函数,STFT 的时间分辨率与其时间

域宽度成正比。

STFT 逆变换定义为

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} STFT_s(u, f)g(u - t) \times \exp(j2\pi fu)du df. \quad (5)$$

干扰抑制过程如图 3 所示,将接收信号经 STFT 变换在时频二维图上进行干扰抑制,干扰抑制后信号经 ISTFT 变换,提取干扰抑制后的时域信号。

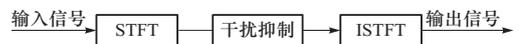


图 3 干扰抑制过程
Fig. 3 Interference suppression process

2.2 脉内步进必要性分析

假设回波信号用 $S_r(t)$ 表示,则

$$S_r(t) = S_i(t) + S_j(t) + n(t). \quad (6)$$

式中: $S_i(t)$ 为目标回波; $S_j(t)$ 为干扰回波; $n(t)$ 为噪声。

STFT 满足线性叠加性,回波信号经 STFT 变换后,

$$STFT_r(t, f) = STFT_i(t, f) + STFT_j(t, f) + STFT_n(t, f). \quad (7)$$

对于 LFM 信号,噪声调制直接转发、重复转发干扰时频图如图 4 所示。由于干扰幅度远大于目标回波和噪声,干扰呈现一个亮带,目标呈现一个暗带,噪声覆盖整个二维平面,当噪声电平大于

目标时,目标暗带淹没于噪声中. 干扰机利用前置掩护,一般先于目标到达雷达天线,并且配合采样

宽度和采样延迟,干扰段转发段与信号在时频图上出现交叠.

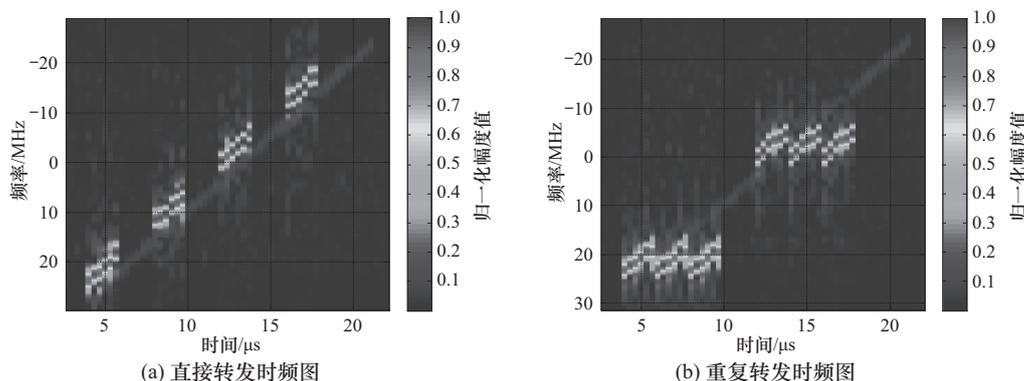


图 4 LFM 噪声调制干扰时频图

Fig. 4 LFM time frequency diagram of noise modulation interference

将时频矩阵分别投影到时间维、频率维进行干扰抑制. 将 $STFT_r(t, f)$ 投影到时间维

$$TP_r(t) = \int \left| STFT_i(t, f) + STFT_j(t, f) + STFT_n(t, f) \right| df. \quad (8)$$

干扰抑制后可在时间维可以提取干扰不连续转发信号段;将 $STFT_r(t, f)$ 投影到频率维

$$TP_r(f) = \int \left| STFT_i(t, f) + STFT_j(t, f) + STFT_n(t, f) \right| dt. \quad (9)$$

干扰抑制后可在频率维可以提取干扰不连续采样信号段. 但由于时频变换不可能是理想的一个细线,且间歇采样的干扰经过噪声调制有一定带宽,干扰在采样段附近形成一个亮带,因此在频率维投影时,不连续采样的信号段会被干扰采样段的边缘覆盖. 另外,干扰信号段在频率维有旁瓣,直接在时频图上将亮带抑制会存在与目标幅度近似的干扰旁瓣

带,旁瓣带将严重影响目标检测. 基于上述两点,需要设计子脉冲频率步进波形,子脉冲间互相掩护,提高不连续采样信号段和干扰段的频率区分度.

脉内步进 LFM 时域的表达式为

$$S_{\text{sub}}(t) = \sum_{m=1}^M S_{\text{st}}[t - (m-1)t_{\text{sub}}] e^{j2\pi[(m-1)\Delta f]t}. \quad (10)$$

式中: $S_{\text{st}}(t) = \begin{cases} Ae^{j\pi k(t-t_{\text{sub}}/2)^2} & 0 < t \leq t_{\text{sub}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$, A 为信号

幅度; M 为子脉冲数; B_{sub} 为子脉冲带宽, t_{sub} 为子脉冲时宽,调频斜率 $k = B_{\text{sub}}/t_{\text{sub}}$,子脉冲间频率间隔 Δf ,当 $\Delta f = B_{\text{sub}}$ 时,为常规 LFM 信号,为提高子脉冲之间的正交性, $\Delta f \geq 2B_{\text{sub}}$. 假设雷达能够分析得到干扰的采样宽度 τ ,令 $t_{\text{sub}} = \tau$,则脉内步进对于 LFM 信号,噪声调制直接转发、重复转发干扰时频图如图 5 所示. 可以看出,干扰不连续采样的数据段在频率维投影时没有被干扰覆盖.

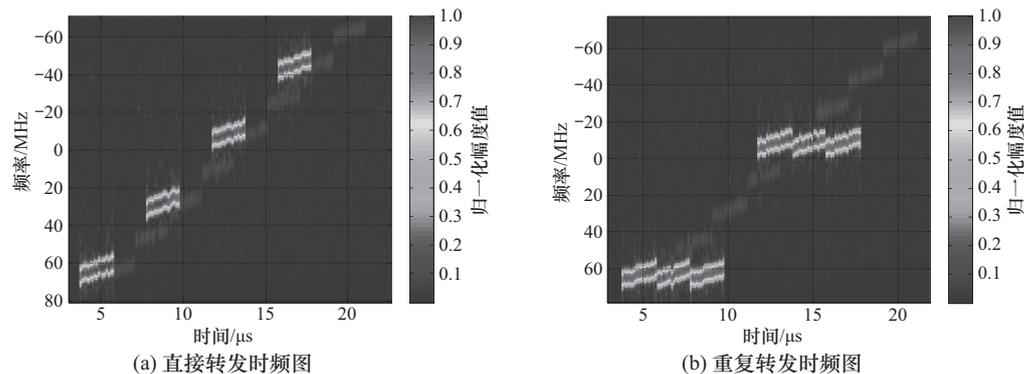


图 5 脉内步进 LFM 噪声调制干扰时频图

Fig. 5 Stepped LFM time frequency diagram of noise modulation interference

2.3 干扰抑制方法

从图 5 时频图上可以看出,干扰抑制有两种方法,一种方法是直接将亮带滤除;另一种方法是将暗带提取出来. 在低信噪比下,暗带淹没在噪声中,暗带不能有效提取,因此采用直接将亮带滤除方法. 在时频维直接滤除亮带,首先需要确知干扰信号与目标回波在时频维的相对幅度,相对幅度通过在时间维提取不连续转发信号段信号获得.

将 $STFT_r(t, f)$ 时频矩阵在时间维投影(行和)抑制干扰时域间歇转发的亮带,由于间歇采样干扰不连续,叠加信号在时间维投影幅度起伏,因此会存在较大方差. 时间维投影方差

$$\Delta_{r0} = \text{var}[TP_r(t)] = \text{mean}[TP_r(t) - \text{mean}(TP_r(t))]^2. \quad (11)$$

以 Δ_{r0} 为基础门限, η_{th} 为比例因子,在时间维抑制干扰. 实际中, η_{th} 与目标信号、干扰、噪声的相对强度有关,可通过多次比对实测或仿真数据结果获得, η_{th} 容限见仿真实验 1.

$$\begin{cases} TP_r(t)^2 \leq \eta_{th} \Delta_{r0} & \text{目标回波} \\ TP_r(t)^2 > \eta_{th} \Delta_{r0} & \text{干扰回波} \end{cases} \quad (12)$$

以 $\eta_{th} \times \Delta_{r0}$ 为干扰抑制门限在时间维抑制干扰. 取时频矩阵时间维干扰抑制后最大值,该最大值即干扰抑制后目标信号叠加噪声的最大值,以该值为门限,在时频两维平面滤除亮带.

当短时 FT 变换窗函数为矩形窗时,其第一旁瓣电平为 13.2 dB,在时间维不连续转发数据段提取时,干扰在频率维叠加,对干扰抑制没有影响;在时频率维干扰抑制时(不连续转发数据段提取+不连续采样数据段提取时),由于干扰能量远大于真实回波能量,频率维无采样子脉冲会被采样子脉冲旁瓣干扰,为减小子脉冲间旁瓣的影响,可以根据干信

比,采用合适主副瓣比的窗韩式. 如:汉明窗(Hamming, 42.5 dB),凯塞窗(Kaiser)等,文中采用 Hamming 窗.

另外,子脉冲间频率步进,使得不连续采样的目标信号在频率维处在干扰较远旁瓣,从而提高抗干扰效果.

2.4 步进 LFM 时频分析抗干扰算法流程

经分析,基于脉内步进 LFM 波形时频分析干扰的信号流程如图 6 所示,核心思想即通过 STFT 变换,将时频矩阵分别投影到时间维,在时间维提取干扰不连续转发信号段;在时间维得到目标回波最大值后,在时频两维平面滤除亮带. 具体算法流程如下.

- ① 接收的基带信号经 STFT 变换到时频两维平面,其中发射信号为脉内步进 LFM,为减小频率维干扰旁瓣对目标影响,STFT 窗函数采用海明窗;
- ② 将时频矩阵投影时间维(行和),以 $\eta_{th} \times \Delta_{r0}$ 抑制干扰,提取干扰不连续转发信号段,并输出干扰抑制后时频矩阵的最大值;
- ③ 以时间维干扰抑制后时频矩阵的最大值为门限抑制时频两维平面亮带,抑制干扰主瓣以及幅度大于目标信号的旁瓣;
- ④ 将②中提取的信号段经 ISTFT 变换到时域,得到不连续转发信号段,ISTFT 采用逆海明窗;
- ⑤ 将③中提取的信号段经 ISTFT 变换到时域,得到不连续转发和不连续采样信号段,ISTFT 采用逆矩形窗,虽损失带外能量,但大大减小干扰旁瓣对目标影响;
- ⑥ 分别将④、⑤提取的信号段分段脉压,比较抗干扰效果,择优选取抗干扰性能较好信号段用于目标检测.

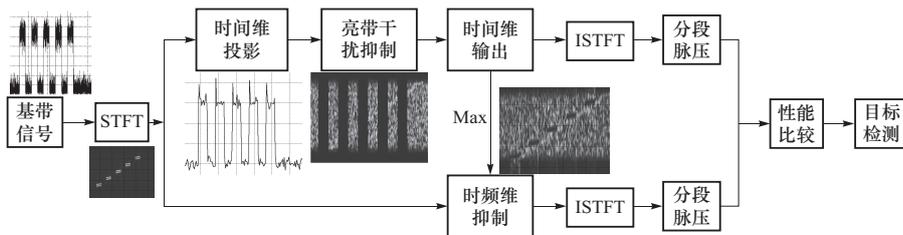


图 6 步进 LFM 信号时频分析抗干扰流程图

Fig. 6 Stepped LFM time frequency diagram of noise modulation interference

3 仿真分析

为验证基于步进 LFM 时频分析抗间歇干扰性

能,设计了 3 组实验:①在不同信干比 SIR(signal-to-interference ratio)和信噪比下,分析时间维干扰抑制门限比例因子 η_{th} 的容限;②给定信干比和 Δf ,

在不同输入信噪比 SNR(signal-to-noise ratio)下,对比无干扰、时间维抑制、时频维抑制分段脉压的输出结果,分析抗干扰性能;③分析不同 SNR、SIR、 Δf 组合,时间维抑制、时频维抑制抗干扰性能,抗干扰性能用相对无干扰时输出 SINR(signal-to-interference-plus-noise ratio)信干噪比损失衡量。

给出 LFM 信号和干扰机参数,LFM 子脉冲带宽 $B_{\text{sub}}=4$ MHz,脉宽 $t_{\text{sub}}=4$ μs ,子脉冲频带间隔 $\Delta f=4B_{\text{sub}}=16$ MHz,采样频率 $f_s=2 \times [(M-1)$

$\Delta f + B_{\text{sub}}]$,子脉冲数 $M=10$ 。目标距初始波门 1.5 km,干扰机前置目标 1 km,噪声调频带宽 $B_m=4$ MHz,调频系数 $K_{\text{FM}}=B_m/2.35$,间歇采样直接转发干扰采样宽度 $\tau=4$ μs , $T_s=8$ μs ,间歇采样重复转发干扰采样宽度 $t_r=4$ μs , $T_r=16$ μs (收一发三),干扰机同步采样发射信号。

3.1 仿真分析 1

仿真不同信干比,信噪比(脉压后)下,时间维干扰抑制门限比例因子 η_{th} 的容限。仿真效果如图 7 所示。

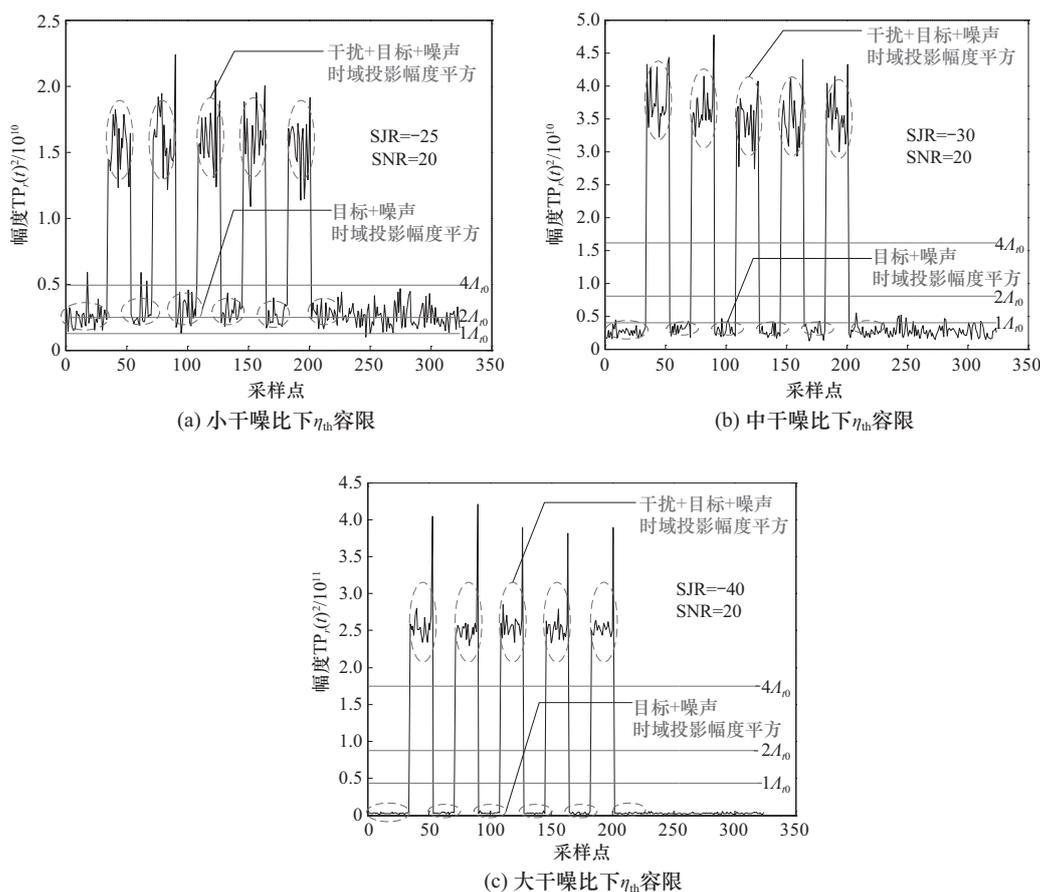


图 7 不同信干比、信噪比 η_{th} 容限

Fig. 7 The η_{th} tolerance under different SIR,SNR

从图中可以看出,在小信干比 INR(interference-plus-noise ratio)(< -25 dB)下,干扰抑制门限比例因子 η_{th} 只受干噪比影响。在小干噪比下,时频矩阵时间维投影幅度平方受噪声起伏影响较大, η_{th} 容限较小, η_{th} 需取值大于 4;在大干噪比下,时频矩阵时间维投影幅度平方受干扰起伏影响较小, η_{th} 容限较大, η_{th} 大于 1 即可。实际场景中,由于目标回波双程衰减,干扰电平远大于目标回波,且干扰电平也远大于噪声,符合大容限情况。

3.2 仿真分析 2

信干比 $\text{SIR} = -30$ dB,分别取输入信噪比(脉压后) $\text{SNR} = 20$ dB、 $\text{SNR} = 15$ dB,分析基于脉内步进 LFM 时频分析抗噪声调制直接转发、噪声调制重复转发干扰性能,脉压输出结果如图 8、9 所示。

根据图 8 和图 9 可以看出,在 $\Delta f = 4B_{\text{sub}}$ 时,采取干扰抑制后,不同信噪比下时间维抑制、时频维抑制基本都可以在目标位置形成峰值,但抗干扰效果不同。对于直接转发干扰,低输入 SNR 时间维抑制

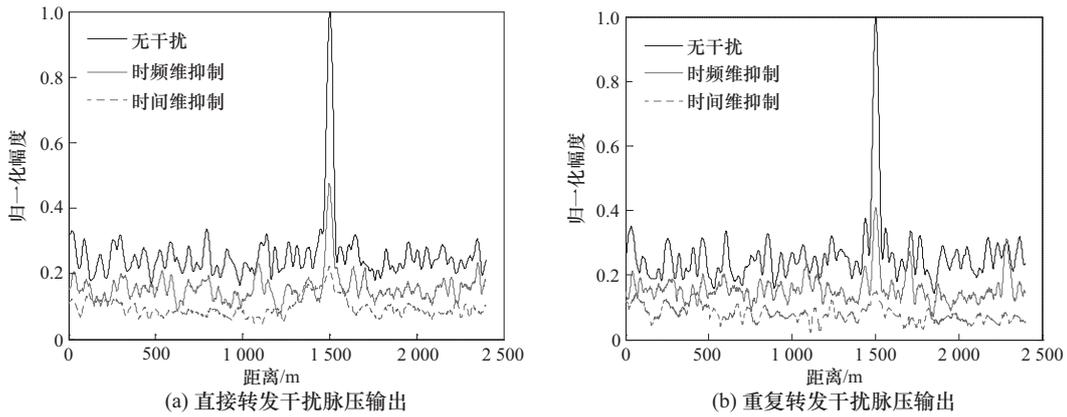


图 8 SNR=15 dB 干扰抑制脉压输出结果

Fig. 8 PC output with SNR=15 dB

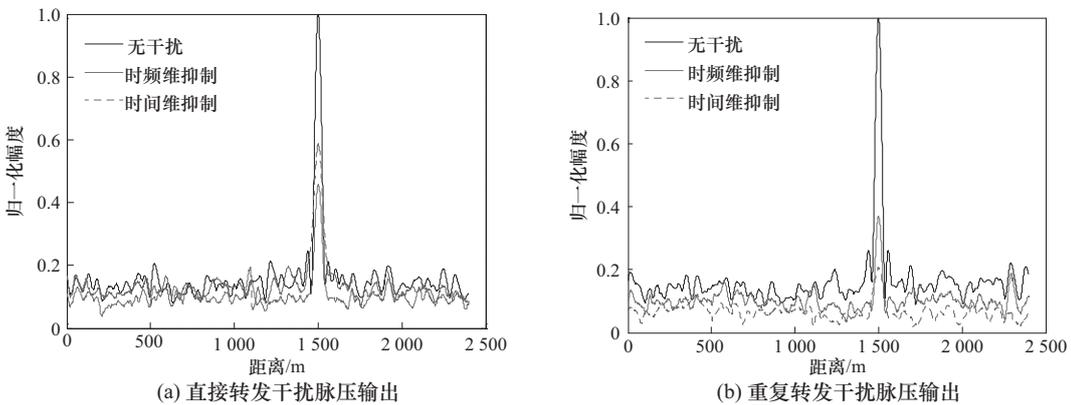


图 9 SNR=20 dB 干扰抑制脉压输出结果

Fig. 9 PC output with SNR=20 dB

后,目标位置峰值较小,时频维抑制较时间维抑制峰值明显,输出 SINR 有所改善;高输入 SNR 时间维抑制较时频维抑制剩余更多能量,输出 SINR 相近.对于重复转发干扰,低输入 SNR 时间维抑制后,由于干扰时域占空比高,目标位置淹没在噪声中,而时频维抑制多提取干扰不连续采样信号段,使得在小 SNR 下也能脉压出尖峰,输出 SINR 改善明显;高输入 SNR,时频维抑制较时间维抑制输出 SINR 也有所改善.

3.3 仿真分析 3

分析不同 SNR、SIR、 Δf 组合,时间维抑制、时频维抑制抗干扰性能. ①SIR = -30 dB,输入 SNR 从 15~25 dB 步进,分别在 $\Delta f = 4B_{sub}$ 、 $\Delta f = 2B_{sub}$ 下进行 100 次蒙特卡罗试验,仿真结果用相对无干扰时 SINR 损失衡量,SINR 损失曲线如图 10(a)(b)所示;②SNR=20 dB,输入 SIR 从 -35 dB 到 -25 dB 步进,分别在 $\Delta f = 4B_{sub}$ 、 $\Delta f = 2B_{sub}$ 下进行 100 次蒙

特卡罗试验,SINR 损失曲线如图 10(c)(d)所示.其中,De-Jam-TF-4B 代表 $\Delta f = 4B_{sub}$ 时频维抑制抗直接转发干扰 SINR 损失;De-Jam-T-4B 代表 $\Delta f = 4B_{sub}$ 时间维抑制抗直接转发干扰 SINR 损失;Re-Jam-TF-2B 代表 $\Delta f = 2B_{sub}$ 时频域抑制抗重复转发干扰 SINR 损失,以此类推.

从图 10(a)和图 10(c)可以看出,对于直接转发干扰,不同输入 SNR,输入 SIR,抑制时间维和时频维抑制抗干扰性能相当,且抗干扰性能基本不随 SNR、SIR 变化而变化,但当 $\Delta f = 2B_{sub}$ 步进频率较小时,随着输入 SNR 的增大,时频维抑制抗干扰性能下降明显,这是由于步进频率较小时,对于直接转发干扰,频率维不连续采样信号提取时干扰旁瓣和边缘将影响分段脉压结果.从图 10(b)和图 10(d)可以看出,对于重复转发干扰,不同输入 SNR,输入 SIR,时频维抑制较时间维抑制抗干扰性能提升明显,时间维抑制抗干扰性能在仿真条件下与输入

SNR、输入 SIR、 Δf 无关;时频维抑制在 $\Delta f = 4B_{\text{sub}}$ 时,时频域抑制输出 SINR 损失随着输入 SNR 和输入 SIR 的增加略有下降,且位于坐标轴最下方,对应抗干扰能力提升(较 $\Delta f = 2B_{\text{sub}}$). 因此,在步进频

率较大时,对于直接转发干扰,时频维抑制的抗干扰性能与时间维抑制的抗干扰性能相当;对于重复转发干扰,时频维抑制的抗干扰性能与时间维抑制的抗干扰性能提升明显.

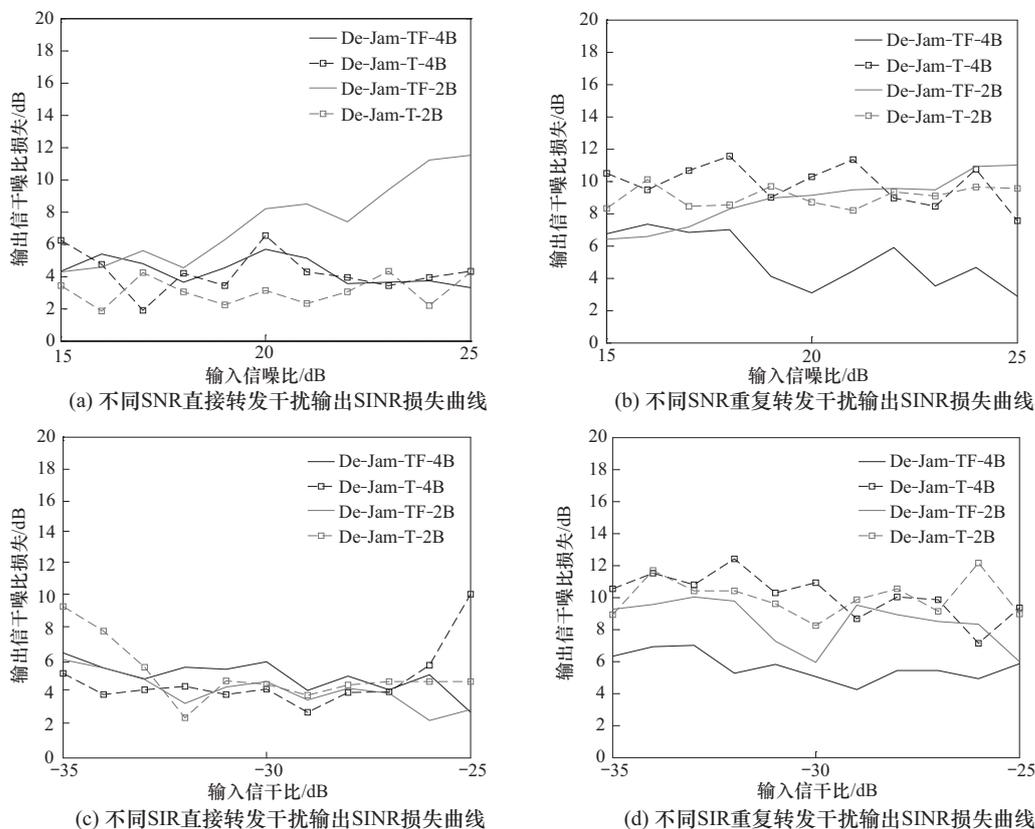


图 10 干扰抑制输出 SINR 损失曲线

Fig. 10 Interference suppression SINR output loss curve

4 结 论

提出了一种基于脉内步进 LFM 时频分析的抗间歇采样干扰方法,以脉内步进 LFM 为发射波形,利用时频矩阵在时间维的投影提取干扰不连续转发的目标信号段,并根据该信号段的最大值为门限在时频矩阵上对干扰进行抑制,不仅可以得到干扰不连续转发信号段,也可以得到干扰不连续采样信号段. 为减小在频率维提取干扰不连续采样段信号时干扰旁瓣对目标信号的影响,采用脉内分段步进,STFT 变换加窗. 仿真结果表明该方法能有效抑制间歇采样不同样式干扰,特别是对于高占空比的重复转发干扰,相对时间维抑制性能提升明显.

参考文献:

[1] Li C Z, Su W M, Gu H, et al. Improved interrupted sampling repeater jamming based on DRFM[C] // Signal

Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Guilin, China: [s. n.], 2014: 254 - 257.

- [2] Yang J, Guo X X, Li Y J. Design of a novel DRFM jamming system based on AFB-SFB[C] // IET International Radar Conference. Xi'an, China: [s. n.], 2013: 1 - 5.
- [3] Feng D J, Tao H M, Yang Y, et al. Jamming de-chirping radar using interrupted-sampling repeater [J]. Science China Information Sciences, 2011, 54(10): 2138 - 2146.
- [4] 张鹏程, 王杰贵. 基于 DRFM 的间歇采样预测转发干扰分析[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(4): 795 - 801. Zhang Pengcheng, Wang Jiegui. Jamming technique of intermittent-sampling predictive repeater based on DRFM[J]. Systems Engineering and Electronic, 2015, 37(4): 795 - 801. (in Chinese)
- [5] 王雪松, 肖顺平, 冯德军, 等. 现代雷达电子战系统建模与仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 131 - 139. Wang Xuesong, Xiao Shunping, Feng Dejun, et al. Mod-

- eling and simulation of modern radar and electronic warfare systems[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 131 - 139. (in Chinese)
- [6] Shi Shuzhu, Zhao Zhengyu, Liu Jingnan. Comparison of radar waveforms combining pseudo-random binary phase coding and chirp modulation for an high-frequency monostatic radar[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2015, 10(5): 935 - 944.
- [7] Guo T, Robert Q. OFDM waveform design compromising spectral nulling, side-lobe suppression and range resolution [C] // IEEE Radar Conference. Cincinnati, USA: [s. n.], 2014: 1424 - 1429.
- [8] Jabrab Akhtar. Orthogonal block coded ECCM schemes against repeat radar jammers[J]. IEEE Transon Aerospace and Electronics Systems, 2009, 45 (3): 1218 - 1226.
- [9] 张劲东, 李晟, 朱晓华. 基于波形分集的雷达抗欺骗干扰[J]. 数据采集与处理, 2010, 25(2): 138 - 142.
Zhang Jindong, Li Sheng, Zhu Xiaohua. Approach of radar against deception jamming based on waveform diversity[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2010, 25(2): 138 - 142. (in Chinese)
- [10] 金珊珊, 王春阳, 邱程, 等. 对抗应答式干扰的射频掩护脉冲设计[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 4(10): 377 - 381.
Jin Shanshan, Wang Chunyan, Qiu Cheng, et al. Design of RF protecting signal for transponder jamming suppression[J]. Journal of CAEIT, 2014, 4(10): 377 - 381. (in Chinese)
- [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 - 275.
Zhou Chang, Tang Ziyue, Yu Fangli, et al. Anti intermittent sampling repeater jamming method based on intrapulse orthogonality [J]. System Engineering and Electronic, 2017, 39(2): 269 - 275. (in Chinese)
- [12] 杨少奇, 田波, 周瑞钊. 利用时频分析的间歇干扰对抗方法[J]. 信号处理, 2016, 32(10): 1244 - 1251.
Yang Shaoqi, Tian Bo, Zhou Ruizhao. ECCM against interrupted sampling repeater jamming based on time-frequency analysis[J]. Journal of Signal Processing, 2016, 32(10): 1244 - 1251. (in Chinese)
- [13] 毛二可, 范花玉. 合成宽带脉冲多普勒雷达[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(12): 2717 - 2724.
Mao Erke, Fan Huayu. Synthetic wideband pulse Doppler radar[J]. System Engineering and Electronic, 2016, 38(12): 2717 - 2724. (in Chinese)
- [14] 王杰贵, 张鹏程. 对线性调频脉冲压缩雷达的多载波调制转发干扰[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(11): 2727 - 2734.
Wang Jiegui, Zhang Pengcheng. Multi-carrier modulation repeater jamming against linear frequency modulated pulse-compression radar[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2015, 37 (11): 2727 - 2734. (in Chinese)
- [15] 张养瑞, 李云杰, 李曼玲, 等. 间歇采样非均匀重复转发实现多假目标压制干扰[J]. 电子学报, 2016, 44(1): 46 - 53.
Zhang Yangrui, Li Yunjie, Li Manling, et al. Suppress jamming technique of multiple false targets on interrupted-sampling and non-uniform periodic repeater[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(1): 46 - 53. (in Chinese)
- [16] 宫健, 金虎兵, 郭艺夺. 一种多域复合调制的雷达灵巧干扰新方法[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(2): 117 - 120.
Gong Jian, Jin Hubing, Guo Yiduo. A new method of multi-domain complex modulation for radar smart jamming[J]. Radar Science and Technology, 2016, 14(2): 117 - 120. (in Chinese)
- [17] 葛哲学, 陈仲生. MATLAB 时频分析技术及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 2 - 12.
Ge Zhexue, Chen Zhongsheng. Time-frequency technology and its application in MATLAB[M]. Beijing: The People's Post and Telecommunications Press, 2006: 2 - 12. (in Chinese)
- [18] 张军. 基于分数阶傅里叶变换步态特征提取[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(6): 90 - 94.
Zhang Jun. Extraction of human gait features based on fractional Fourier transforms[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(6): 90 - 94. (in Chinese)

(责任编辑: 刘芳)