

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209839

一种线性调频连续波探测抗雷达辐射源干扰方法*

胡泰洋, 邵晓浪, 肖孟煊, 李凡奇, 薛文, 肖泽龙
(南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094)

摘要:随着各类军用、民用辐射源频段的不断扩展以及功率的不断提升,线性调频连续波(LFMCW)探测器面对此类干扰的威胁也愈加严重。然而,目前关于 LFMCW 体制抗干扰技术的研究主要围绕在对抗有源干扰,鲜有针对强辐射源干扰的研究。针对上述问题,以对抗大功率雷达辐射源干扰为背景,本文对常规脉冲和线性调频脉冲信号两种典型的雷达辐射源信号进行建模,并分析其对 LFMCW 探测器的干扰机理。根据目标回波信号和干扰信号在时频域上的差异,提出了一种基于时频变换和边缘检测的干扰抑制算法。首先使用短时傅里叶变换(STFT)获得接收信号的时频图像,利用脉冲干扰在时间轴上的周期截断特征,在时频域进行干扰的粗滤波;然后结合边缘检测技术,沿着频率轴使用 Sobel 算子进行卷积,进一步滤除残留的干扰,重构滤波后的频谱,提取目标信息。仿真及实验结果表明,该算法能够有效地抑制两种典型的脉冲体制雷达辐射源信号干扰,在干扰背景下提取目标差频频率的精度优于 3%。

关键词:线性调频连续波;雷达辐射源干扰;时频变换;边缘检测

中图分类号: TJ43 TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Methods of anti-radar emitter signal jamming for linear frequency modulated continuous wave detector

Hu Taiyang, Shao Xiaolang, Xiao Mengxuan, Li Fanqi, Xue Wen, Xiao Zelong

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: With the expansion of frequency bands and power enhancement of various military and civilian radiation sources, the interference suffered by linear frequency modulated continuous wave (LFMCW) detectors has become more seriously. However, the current researches on the anti-jamming technology for the LFMCW system mainly focus on countering active jamming, and there are few studies on interference from strong radiation sources. To solve the above problems, against the background of the interference of high-power radar radiation sources, two typical radar signals including conventional pulses and chirp pulses are modeled, and the interference mechanism for LFMCW detectors is analyzed. According to the difference between target echo signal and jamming in time-frequency domain, an interference suppression algorithm combining time-frequency transform and edge detection is proposed in this article. In the proposed algorithm, the short-time Fourier transform (STFT) is firstly used to obtain the time-frequency image of the received signal. Exploiting the periodic truncation characteristics of the pulse interference across the time axis, the interference is coarsely filtered in the time-frequency domain. Then, combined with the edge detection technology, the algorithm adopts the Sobel operator to perform convolution along the frequency axis to further filter out the residual interference, reconstruct the filtered spectrum, and extract the target information. Simulation and experimental results show that the proposed algorithm can effectively suppress the signal interference of two typical pulsed radar emitters, and the accuracy of obtained target difference frequency from the interference background is within 3%.

Keywords: linear frequency modulation continuous wave; radar emitter interference; time-frequency transform; edge detection

0 引言

随着固态微波器件和数字信号处理技术的发展,线性调频连续波(linear frequency modulated continuous wave, LFMCW)体制得到越来越多的关注,它不存在距离盲区,容易实现近距离高分辨率多目标的探测^[1]。毫米波 LFMCW 探测器射频带宽大,测距精度高,且具有一定的抗干扰能力,被广泛应用于中小型弹药引信、导引头^[2]。

目前关于毫米波 LFMCW 抗干扰技术的研究主要围绕在对抗典型有源干扰,例如压制式干扰、欺骗式干扰等^[3-5]。鲜有关注 LFMCW 针对于强辐射源的研究,例如高功率的侦查雷达、预警雷达等。然而,随着各类军用、民用辐射源频段的不断扩展、功率的不断提升,毫米波 LFMCW 探测器面临此类干扰也愈加严重,仅凭借本身的频段抗干扰能力已经远远不足。因此,亟需开展毫米波 LFMCW 体制对抗强辐射源干扰,特别是高功率雷达干扰的研究。

当雷达辐射源干扰信号进入 LFMCW 探测器,通过与探测器的参考信号混频后,会对参考信号进行调制,其调制后的干扰形式由雷达干扰信号形式和参考 LFM 信号共同决定。根据干扰与目标回波在时域、频域、统计域以及变换域的差异,可以进行区分^[6]。文献[7-8]针对 LFM 信号,利用分数阶傅里叶变换(fractional Fourier transform, FRFT)和经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)抑制窄带干扰,但是只适用于单频或多频干扰的抑制。文献[9]针对脉冲干扰,对接收信号进行慢时域滤波,通过门限判决的方式区分目标回波和干扰,从而对消。文献[10]利用脉冲干扰在时频域上的特征,提出了一种时频域滤波算法,抑制脉冲干扰。文献[11-12]分析了线性调频干扰和正弦调频干扰对伪随机码连续波雷达的干扰,并提出了一种结合时频变换和滤波技术的算法进行干扰抑制。文献[13]研究了雷达抗干扰关键指标计算模型及其半实物测试方法。

虽然上述算法不是专门为 LFMCW 探测器对抗雷达辐射源干扰设计的,但是仍有一定的借鉴意义。本文首先对常规脉冲和线性调频脉冲信号这两种典型的雷达信号进行建模,然后分析其对 LFMCW 探测器的干扰机理。最后根据目标回波信号和雷达信号在时频域上的差异,提出了一种结合时频变换和边缘检测的雷达信号干扰抑制算法。仿真及实验结果表明,所提算法能够有效地抑制雷达信号干扰。

1 常规脉冲和线性调频脉冲信号建模

受限于连续波体制雷达固有的信号泄露问题,连续波雷达的功率往往不高,高功率雷达通常采用脉冲

体制,因此本文主要对脉冲体制的雷达辐射源信号进行分析。常规脉冲信号和线性调频脉冲信号在雷达中被广泛使用,本节主要针对这两种信号进行建模分析。

设雷达发射信号为 $p(t)$,当雷达发射脉宽为 τ 、脉冲重复周期为 T_s 、载频为 f_j 的矩形脉冲串时, $p(t)$ 可以建模为:

$$p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) e^{j2\pi f_j t} \otimes \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \quad (1)$$

其中,“ \otimes ”为卷积计算符号。利用傅里叶变换关系:

$$\text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) e^{j2\pi f_j t} \leftrightarrow \tau \text{Sa}(\pi(f - f_j)\tau) \quad (2)$$

$$\sum_{-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \leftrightarrow \frac{1}{T_s} \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(f - nf_s) \quad (3)$$

其中, $f_s = \frac{1}{T_s}$ 为采样频率, $\text{Sa}(x) = \sin x/x$,

$\text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right)$ 表示脉宽为 τ 的矩形包络,可得其频谱 $P(f)$ 为:

$$P(f) = \sum_{-\infty}^{\infty} \tau f_s \text{Sa}[\pi(f - f_j)\tau] \delta(f - nf_s) \quad (4)$$

由式(4)可知,周期脉冲串频谱以 f_j 为中心频率,包络呈 Sa 函数分布,频谱是离散的且谱线间隔为 f_s ,带宽为 $1/\tau$ 。

LFM 脉冲是雷达的常用波形之一,在脉内进行 LFM 调制使得脉冲串具备大的带宽。当雷达发射一个 LFM 脉冲串时, $p(t)$ 可以表示为:

$$p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) e^{j2\pi(f_j + \frac{1}{2}k_j t^2)} \otimes \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \quad (5)$$

其中, k_j 为线性调频脉冲串的调频率, $k_j = \frac{B_j}{\tau}$, B_j 为雷达发射信号的调制带宽。根据傅里叶变换和卷积的性质,可得线性调频脉冲串的频谱为:

$$P(f) = \sum_{-\infty}^{\infty} U(f - f_j) \delta(f - nf_s) \quad (6)$$

其中, $U(f)$ 为 LFM 脉冲信号的频谱,可以表示为:

$$U(f) \approx \frac{1}{\sqrt{k_j}} e^{-j\pi f^2/k_j + \pi/4} \text{rect}\left(\frac{f}{B_j}\right) \quad (7)$$

由式(6)可知,LFM 脉冲串信号的频谱是离散的,中心频率为 f_j ,频谱包络近似为矩形,且谱线间隔为 f_s 。

2 干扰机理分析

雷达辐射源干扰信号通过天线进入 LFMCW 探测器,与发射信号进行混频,经过滤波、放大、AD 采样后剩余的干扰成分叠加在目标回波信号上,影响探测器对目标的正常探测。

以锯齿波调频信号为例,LFMCW 探测器的发射信号可以建模为:

$$s_i(t) = Ae^{j2\pi(f_0t + \frac{1}{2}\mu t^2)} \quad (8)$$

式中: A 为发射信号的振幅, f_0 为发射信号的载频, $\mu = \frac{B}{T}$ 为发射信号的调频斜率, B 为调制频偏, T 为调制周期。

雷达辐射源干扰信号进入接收机并与发射信号混频,记混频后的信号为 $s_j(t)$, 可表示为:

$$s_j(t) = s_i(t)p^*(t) = Ae^{j2\pi(f_0t + \frac{1}{2}\mu t^2)} \times \left(\text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) e^{j2\pi(f_j t + \psi(t))} \otimes \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s - \Delta\tau) \right)^* = Ae^{j2\pi(f_0t + \frac{1}{2}\mu t^2)} \times \sum_{n=0}^N \left\{ \text{rect}\left[\frac{(t - nT_s - \Delta\tau)}{\tau}\right] \times e^{-j2\pi(f_j(t - nT_s - \Delta\tau) + \psi(t - nT_s - \Delta\tau))} \right\} \quad (9)$$

其中, $(\cdot)^*$ 表示共轭计算符号, $\Delta\tau$ 表征干扰进入探测器的时延, $\psi(t)$ 表示调制相位函数, 可以表征不同调制的脉冲信号, 当雷达辐射源信号 $p(t)$ 为常规脉冲时, 此时 $\psi(t) = 0$; 当雷达辐射源信号 $p(t)$ 为线性调频脉冲时, 此时 $\psi(t) = \frac{1}{2}k_f t^2$ 。

便于表述, 假设 $\Delta\tau = 0$, 以常规脉冲串为例, 则式(9)可以表示为:

$$s_j(t) = \sum_{n=0}^N \text{rect}\left[\frac{(t - nT_s)}{\tau}\right] e^{j2\pi(f_0 - f_j)t + \frac{1}{2}\mu t^2 + jf_j T_s} \quad (10)$$

由式(10)可知, 当雷达辐射源干扰信号为常规脉冲串时, 其物理意义可以看作是对载频为 $f_0 - f_j$, 调频率为 μ 的线性调频信号进行多周期的截断, 其干扰频谱同样可以表征为多段线性调频信号的组合。为了方便表述, 将在载频 $f_0 - f_j$ 附近的主要干扰区域定义为**主带干扰**, 而远离载频 $f_0 - f_j$ 的拖尾区域定义为**边带干扰**。

主带干扰能量强, 具备一定的干扰带宽, 一旦进入 LFMCW 探测器中频通带中, 会淹没目标回波信号, 影响探测器的正常识别。而边带干扰主要是由脉冲的截断效应导致的, 这一部分干扰能量较弱, 但是由于部分雷达干扰的功率远远大于目标回波信号, 边带干扰仍然会对探测器正确识别造成影响, 因此需进行抑制。以脉宽为 $10 \mu\text{s}$, 脉冲重复周期为 $20 \mu\text{s}$ 的矩形脉冲串为例, 干扰进入探测器时延 $\Delta\tau$ 随机设置, 主带干扰和边带干扰如图 1 所示。

由于器件水平的限制, 目前大功率的雷达辐射源通常都工作在 UKF-Ku 波段, 其频段与毫米波 LFMCW 探测器的工作频段不同。且大多数情况下, 探测器和干扰辐射源的工作频率不可能完全一致, 因此本文主要针对边带干扰的抑制开展研究。

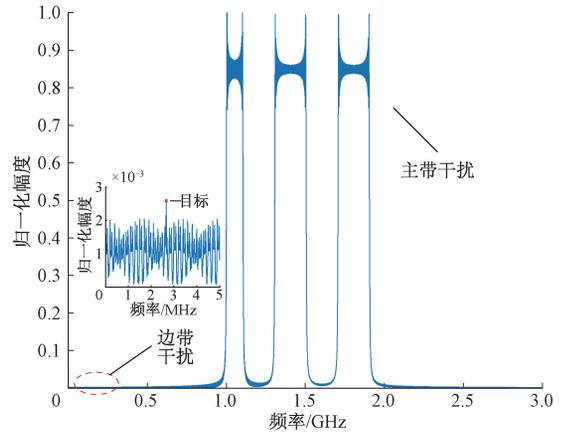


图 1 常规脉冲串干扰频谱图

Fig. 1 Spectrum of pulse burst interference

3 基于时频变换和边缘检测的雷达辐射源信号干扰抑制方法

本文所提方法首先采用短时傅里叶变换 (short-time Fourier transform, STFT) 进行时频分析, 然后根据脉冲干扰的周期截断特性进行时频域粗滤波, 同时引入边缘检测的方法滤除剩余干扰, 最后提取目标信息。

3.1 短时傅里叶变换

短时傅里叶变换在时频分析中被广泛应用, 信号 $r(t)$ 的 STFT 表示如下:

$$\text{STFT}_r(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} r(\tau) w^*(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (11)$$

其中, $w(t)$ 是窗函数, 且是一个满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} |w(t)|^2 dt = 1$ 的低通滤波器。可以看出, STFT 时间分辨率和频率分辨率之间存在不确定关系。这意味着精细的频率分辨率导致粗略的时间分辨率, 反之亦然。因此, 在选择合适的分析窗口时, 需要在时间和频率分辨率之间进行权衡。短窗口更适合短信号, 而频率分辨率更高的长窗口更适合窄带信号。

将离散时间信号 $r(n)$ 的 STFT 定义为:

$$\text{STFT}_r(n, k) = \sum_{m=-L/2}^{L/2} r(n+m) w(m) e^{-j2\pi(n+m)k/L} \quad (12)$$

其中, $w(m)$ 是窗函数的离散形式, L 为分析窗长度。

3.2 边缘检测

在 LFMCW 探测器信号处理流程中, 一个理想点目标的回波差拍信号是一个点频信号, 因此其在时频图上表现为一条沿着时间轴分布且频率固定的直线。而脉冲体制雷达辐射源信号引入的边带干扰分布在探测器

中频通带,沿着时间轴以一定间隔分布,间隔取决于脉冲重复周期,因此其在时频图上表现为一连串与目标回波信号谱线垂直的谱线。

由于脉冲体制雷达辐射源信号引入的边带干扰在时频域上沿着时间轴以一定间隔分布,因此在时间维度上,大部分的干扰幅度大于沿着时间轴的幅度均值。而目标回波信号在时频域上沿着时间轴是连续的,且干扰的存在提高了沿着时间轴的幅度均值,因此大部分的目标回波信号不会大于沿着时间轴的均值。利用这一特性,以时频域上沿着时间轴的幅度均值作为阈值,能够滤除大部分干扰,但是仍会有小部分的干扰残留。残留的干扰往往是干扰能量的边缘部分,因此引入图像处理中的边缘检测算法进一步抑制。

Sobel 算子是典型的基于一阶导数的边缘算子,根据图像像素点上下、左右邻点灰度加权差在边缘达到极值这一现象检测边缘。Sobel 算子包含两组 3×3 的滤波器,分别对水平和垂直的边缘敏感,鉴于目标回波在时频域为一条沿着时间轴的直线,为了避免滤除目标信号,因此引入垂直方向上的滤波器模板 G_y , 可以表示为:

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

设经过混频、滤波、AD 采样后的含干扰和目标的回波信号为 $r(n)$, 基于时频变换和边缘检测的雷达辐射源干扰抑制算法具体实现流程如下:

1) 计算 $r(n)$ 的 STFT 系数如下:

$$R(k, n) = \text{STFT}(r(n)) \quad (14)$$

其中, n 为时间窗索引, k 为频率窗索引;

2) 对于每一个频率窗索引 k , 计算 $R(k, n)$ 沿着时间轴的平均值 $T(k)$:

$$T(k) = \frac{1}{N_T} \sum_{n=1}^{N_T} |R(k, n)| \quad (15)$$

其中, N_T 为时间窗总数。

3) 对于每一个时间窗索引 n , 如果 $R(k, n)$ 满足:

$$R(k, n) \geq T(k) \quad (16)$$

则设 $R(k, n) = 0$, 否则不变。

4) 将修订后的 $R(k, n)$ 沿着 k 方向与 Sobel 算子滤波器模板 G_y 进行卷积, 得到最终的时频谱 $R_c(k, n)$:

$$R_c(k, n) = R(k, n) \otimes G_y \quad (17)$$

5) 对 $R_c(k, n)$ 沿着时间轴 n 求和, 得到边缘提取后的频谱结果:

$$F(k) = \sum_{n=1}^{N_T} R_c(k, n) \quad (18)$$

6) 在干扰抑制后的频谱 $F(k)$ 上使用恒虚警技术 (constant false alarm rate, CFAR) 进行目标检测, 找到目标时频线边界对应的谱线 f_b^{up} 和 f_b^{down} , 将其进行平均处理

获得目标的差频频率 $f_{tar} = (f_b^{up} + f_b^{down})/2$ 。根据 LFM CW 体制中差频与距离对应关系, 可以计算出目标距离。

4 仿真分析

为了验证本文算法的有效性, 采用 MATLAB 进行仿真。LFMCW 探测器采用锯齿波调频信号, 调频带宽 B 设为 1 GHz, 调频周期 $T = 100 \mu\text{s}$, 采样频率为 100 MHz, 对应的采样点数 N 为 5 000。接收信号 SNR 设为 10 dB, 目标距离设置为 20 m, 对应的差频频率为 2.666 7 MHz, 干信比设置为 90 dB, STFT 窗长设置为 256, 为了提高 STFT 的时间定位能力, 采用重叠窗设置, 重叠窗长度为 252, 即每次滑动 4 个采样时间, 傅里叶变换点数为 1 024 点, 本文主要研究典型脉冲信号边带干扰对毫米波 LFM CW 探测器的影响, 因此在试验中设置探测器和雷达辐射源干扰的载频差为 1 GHz。雷达辐射源干扰的其它相关参数如表 1 所示。

表 1 雷达辐射源干扰参数

Table 1 The parameters of radar emitter signal

雷达信号类型	脉冲宽度/ μs	脉冲周期/ μs	调频带宽/MHz
常规脉冲	1	10	-
线性调频脉冲	1	10	250

4.1 回波加干扰信号模拟

为了验证第 2 节中常规脉冲和线性调频脉冲对 LFM CW 探测器干扰机理分析的正确性, 本小节给出了常规脉冲串、线性调频脉冲串进入探测器, 并与发射参考信号进行混频后的频谱图, 如图 2 和 3 所示, 干扰进入探测器的延时 $\Delta\tau$ 在 $(0, \tau)$ 内随机设置。

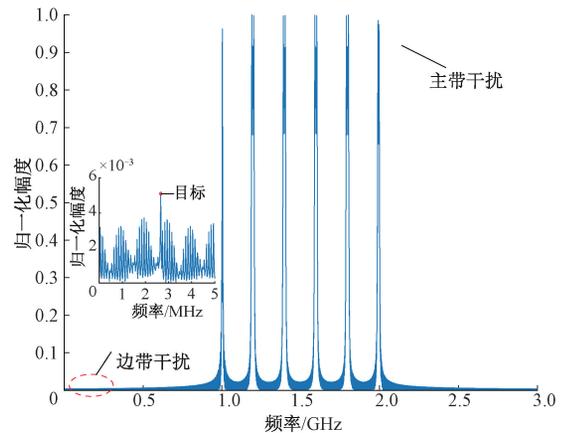


图 2 含常规脉冲干扰回波信号频谱

Fig. 2 Spectrum of echo signal with conventional pulse interference

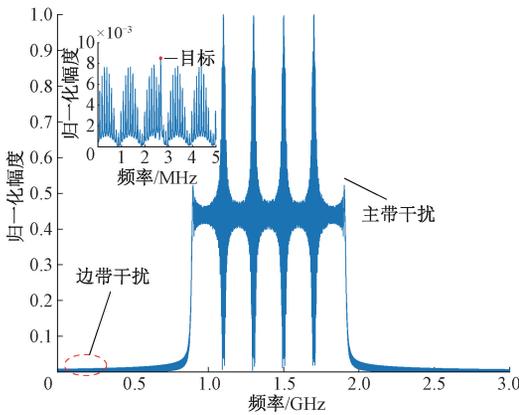


图 3 含线性调频脉冲干扰回波信号频谱

Fig. 3 Spectrum of echo signal with LFM pulse interference

由图 2 中可以看出,常规脉冲串与探测器发射参考信号混频,可以看作用周期性的矩形窗对发射的调频信号进行周期性的截断,因此在频域上表现出多段调频信号的叠加。其中由于干扰进入探测器的延时 $\Delta\tau$ 是随机的,因此第一段调频信号的带宽和后两段不同。

由图 3 可以看出,线性调频脉冲干扰与探测器发射参考信号混频后的频谱同样表现为多段线性调频信号的组合。不同的是,图 2 中各段调频信号的调频率与探测器发射信号一致,而图 3 中调频信号的调频率和线性调频脉冲干扰的调频率有关。根据这种特征差异,利用分数阶傅里叶变换估计调频率,可以有效辨识两类干扰^[14-16]。图 2 和 3 中探测器中频通带内的干扰都呈现离散的谱线形式,这是由于脉冲干扰的周期性导致的。

分析图 2 和 3 可知,当进入探测器的干信比达到一定程度时,由于矩形窗截断产生的频谱泄露,导致虽然干扰和探测器的载频不同,边带干扰仍能泄露至探测器中频通带,导致通带内底噪的抬升,影响目标检测。

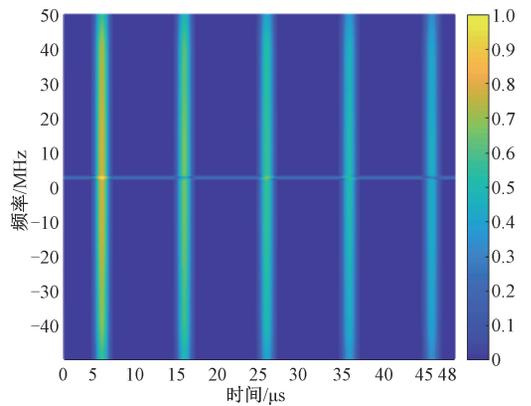
4.2 回波加干扰的时频变换

为了研究目标回波信号、常规脉冲和线性调频脉冲在时频域上的差异,将滤波、AD 采样后的两类干扰加目标信号进行 STFT 仿真,得到图 4。

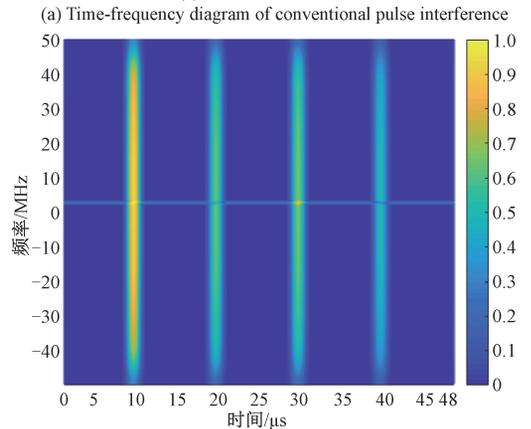
从图 4 中可以发现,目标回波信号呈现沿时间轴分布、单一频率的直线,而常规脉冲干扰和线性调频脉冲干扰周期性的出现在不同的时刻、沿着频率轴分布。图 4 中相邻的两段干扰之间的时间差为 $10\ \mu\text{s}$,和脉冲重复周期相同,各段干扰持续的时间和脉冲宽度相同,即为 $1\ \mu\text{s}$ 。利用干扰在时频域上沿时间轴周期截断特性,可以进行干扰的粗滤波。

4.3 干扰抑制效果仿真

为了验证本文所提算法的有效性,按照第 3 节所描述的流程进行仿真。



(a) 常规脉冲干扰时频图



(b) 线性调频脉冲干扰时频图

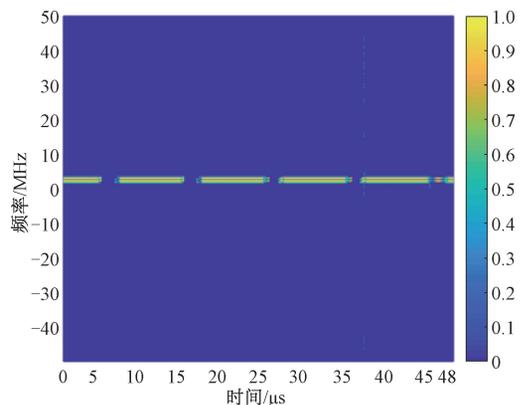
(b) Time-frequency diagram of LFM pulse interference

图 4 含干扰的回波信号时频图

Fig. 4 Time-frequency diagram of echo Signal with interference

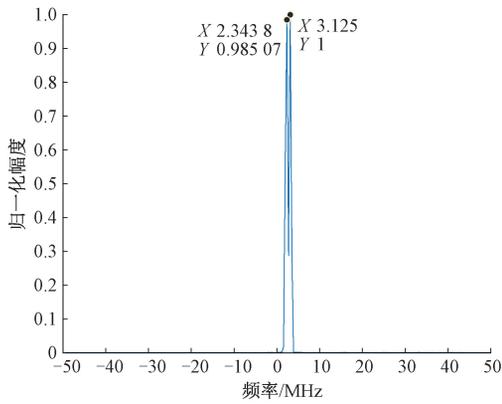
针对典型脉冲串干扰,本文所提算法的干扰抑制效果如图 5 所示。对比图 5(a)和 4(a)可以看出,大部分的干扰能量被成功滤除,只有小部分干扰由于其具有较高的梯度而被误识别为边缘信息,但是这部分干扰非常小,基本不会对目标检测造成影响。

在未抑制干扰前,图 2 中局部放大的含干扰的频谱图中存在大量的干扰谱线,严重影响目标识别。而从



(a) 干扰抑制后时频图

(a) Time-frequency diagram after interference suppression



(b) Signal spectrum after interference suppression

图5 常规脉冲干扰下本文算法的干扰抑制效果

Fig. 5 Interference suppression effect of the proposed algorithm for conventional pulse interference

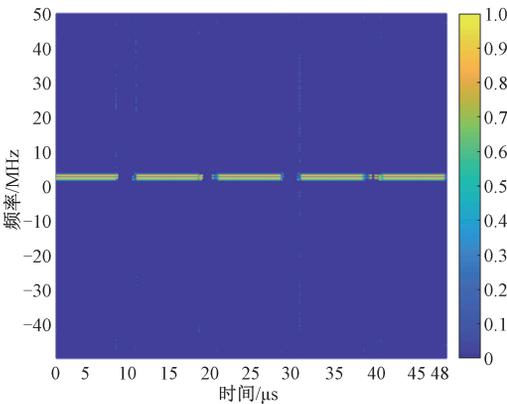
图5(b)中,可以明显看出干扰得到了有效抑制,从而证明了本文算法的有效性。

针对线性调频脉冲干扰,本文算法干扰抑制效果如图6所示。由图6可知,本文算法同样适用于线性调频

脉冲干扰。通过将图5(b)和6(b)中目标信号边缘谱线平均可得目标差频频率为2.7344 MHz,与目标理论差频频率相差2.54%,这是由于STFT是对数据进行加窗傅里叶变换,其有效的傅里叶变换点数长度变短,导致固定测频误差提高,但是相对于其提升的抗干扰能力而言,上述误差是可以接受的。

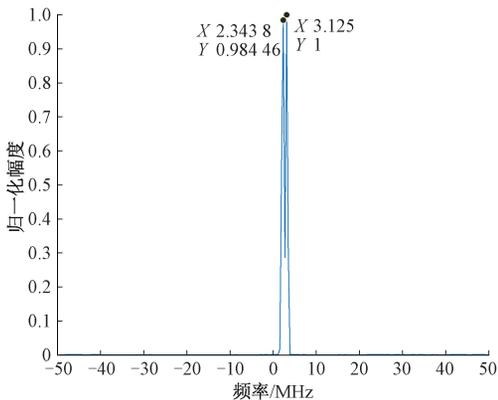
5 实验校验

为了进一步验证本文算法对实测数据的有效性,开展实物仿真实验。由于实验条件的限制,采用信号源模拟辐射源干扰信号,目标回波信号使用目标模拟器模拟,信号源输出功率7 dBm,发射信号输出功率17 dBm,采样率为100 MHz,目标回波模拟器固定衰减100 dB,不考虑其它损耗的情况下,干扰目标干信比JSR 大约为90 dB。将混合信号注入到探测器前端中,经过限幅、滤波、AD采样后获得实测数据,利用该实测数据进行算法验证。探测器和干扰的载频差为1 GHz,脉冲宽度1 μs,重复周期10 μs。图7给出了常规脉冲干扰下的实测数据分析。



(a) 干扰抑制后时频图

(a) Time-frequency diagram after interference suppression

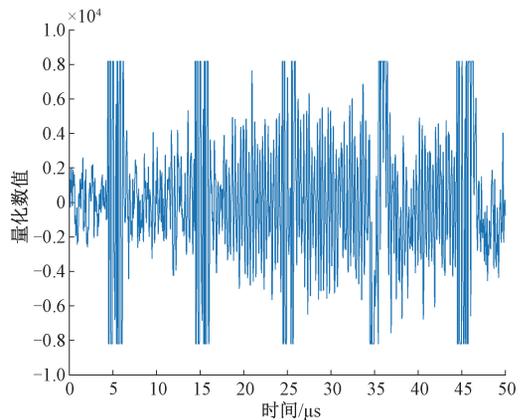


(b) 干扰抑制后的信号频谱

(b) Signal spectrum after interference suppression

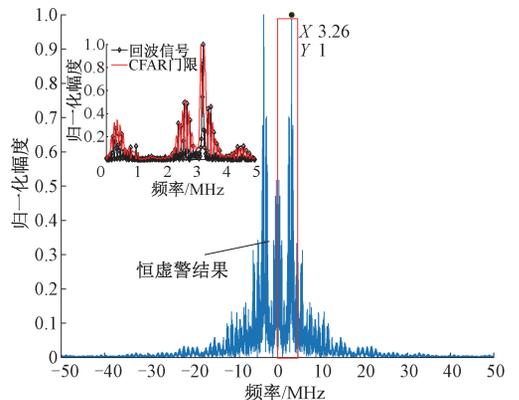
图6 线性调频干扰下本文算法的干扰抑制效果

Fig. 6 Interference suppression effect of the proposed algorithm under LFM interference



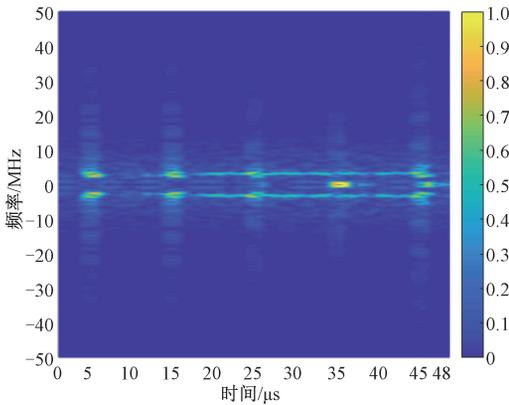
(a) 含常规脉冲干扰的实测回波信号

(a) Measured echo signal with conventional pulse interference



(b) 实测回波信号的频谱及CFAR结果

(b) Spectrum and CFAR results of measured echo signal



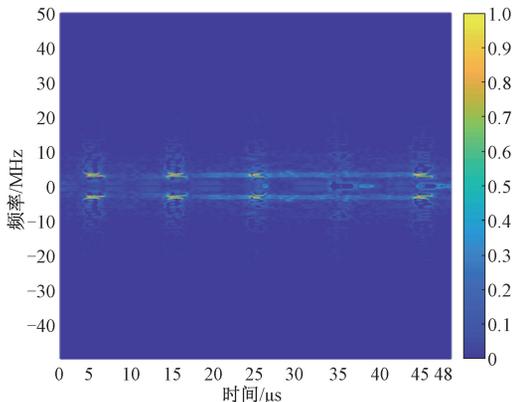
(c) 实测回波信号的时频图
(c) Time-frequency diagram of measured echo signal

图 7 常规脉冲干扰下实测回波信号

Fig. 7 Measured echo signal for conventional pulse interference

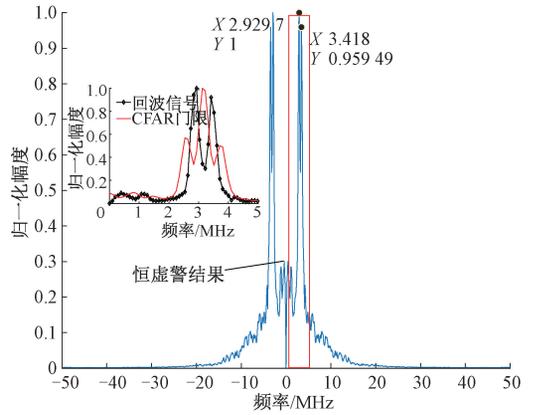
图 7(a) 为一个信号处理周期内的时域波形图, 干扰进入探测器后表现为削峰的周期脉冲串。事实上, 由于本文中探测器的目标为强辐射源, 其功率往往是探测器发射功率的数百倍甚至更高。尤其是在近距离探测过程中, 干扰辐射信号直接从探测器主瓣进入, 如果不加装限幅电路, 甚至会导致电路烧毁。因此为了使探测器正常工作, 通常会加装限幅电路。在本文使用的试验样机中, 限幅水平为 15 dBm, 因此实测干扰回波在时域上存在削峰影响。从图 7(b) 中可以看出, 常规脉冲串信号干扰进入探测器中频通带后, 产生的干扰谱线具有和图 2 类似的分布, 且干扰谱峰多次超过 CFAR 门限, 被误识别为目标。图 7(c) 和图 5(a) 中的干扰均表现出在时间轴上周期间断分布, 且相邻干扰之间的时间差为脉冲宽度, 这证明了仿真的正确性。由于在仿真中采用了复信号, 而实测数据为实信号, 因此在图 7 目标回波信号对应的时频谱线有两根, 在零频上下对称分布, 而图 5 中目标回波谱线仅有一根。

针对实测数据采用提出算法进行典型脉冲干扰抑制, 抑制效果如图 8 所示。



(a) 干扰抑制后回波信号时频图

(a) Time-frequency diagram of echo signal after interference suppression



(b) 干扰抑制后回波信号频谱和CFAR结果

(b) Spectrum of echo signal and CFAR results after interference suppression

图 8 常规脉冲干扰下所提算法的效果

Fig. 8 Effect of the proposed algorithm for conventional pulse interference

对比图 8(a) 和 7(c) 可以看出, 在对应的时频区域, 干扰得到了有效抑制。对比图 8(b) 和 7(b) 可以发现, 通带内的干扰被有效抑制, 通过提取的信号边缘谱线求得目标差频频率为 3.17 MHz, 与信号的理论差频频率 3.26 MHz 仅相差 2.76%, 这证明了本文所提出算法的有效性。

6 结 论

本文针对 LFM CW 探测器可能面临的雷达辐射源信号干扰问题, 提出了一种结合时频变换和边缘检测的雷达辐射源信号干扰抑制算法。首先分析了两种典型的雷达辐射源信号, 即常规脉冲串信号和线性调频脉冲信号, 然后根据干扰和目标回波的时频特征进行粗滤波, 利用边缘检测的方法滤除剩余干扰。仿真和实验均验证了本文所提出的算法能够有效地抑制雷达辐射源信号干扰并准确提取目标信号。

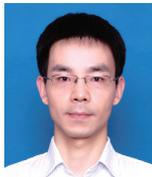
参考文献

[1] 张容权, 杨建宇, 熊金涛, 等. 对称三角线性调频连续波信号模糊函数分析 [J]. 电子学报, 2004, 32(3): 353-356.
ZHANG R Q, YANG J Y, XIONG J T, et al. Analysis of ambiguity function of symmetrical triangular linear frequency modulation continuous wave signal [J]. Chinese Journal of Electronics, 2004, 32(3): 353-356.

[2] 王铭伟, 肖泽龙, 高雯, 等. 一种线性调频连续波探测抗欺骗式干扰方法 [J]. 兵工学报, 2019, 40(4): 753-761.
WANG M W, XIAO Z L, GAO W, et al. An anti-deception jamming method for LFM CW detector [J].

- Acta Armamentarii, 2019, 40(4): 753-761.
- [3] 奚舒靓, 张仁李, 盛卫星, 等. 基于 MTD 的 LFM 雷达对抗 DRFM 干扰方法 [J]. 制导与引信, 2017, 38(1): 37-41.
XI SH L, ZHANG R L, SHENG W X, et al. DRFM jamming suppression method based on MTD for LFM radar [J]. Guidance & Fuze, 2017, 38(1): 37-41.
- [4] 董洪亮, 谢玲, 于悦. 基于 LFM 信号差拍处理的抗干扰算法仿真分析[J]. 现代雷达, 2013(5): 40-43.
DONG H L, XIE L, YU Y. Simulation and analysis of anti-jamming algorithm based on lfm diff-pat dealing [J]. Modern Radar, 2013(5): 40-43.
- [5] 尹洪伟, 李国林, 隋鉴. 一种新的 LFM 引信距离欺骗干扰抑制算法[J]. 电讯技术, 2014, 54(1): 52-57.
YIN H W, LI G L, SUI J. A new LFM fuze distance deception jamming suppression arithmetic [J]. Telecommunication Engineer, 2014, 54(1): 52-57.
- [6] 唐斌, 赵源, 蔡天一, 等. 雷达抗有源干扰技术现状与展望 [J]. 数据采集与处理, 2016, 31(4): 623-639.
TANG B, ZHAO Y, CAI T Y, et al. Advances and perspectives in radar ECCM techniques of active jamming [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2016, 31(4): 623-639.
- [7] ELGMEL S A, SORAGHAN J J. Using EMD-FrFT filtering to mitigate very high power interference in chirp tracking radars [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2011, 18(4): 263-266.
- [8] ELGAMEL S A. Using empirical mode decomposition and fractional Fourier transform-segment filtering algorithm to suppress high-power interference in non-linear chirp radars [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2016, 10(5): 892-900.
- [9] HARTLEY J D. A method for suppression of pulsed interference in a pulse Doppler radar [C]. IEEE International Conference on Radar, IEEE, 2008: 265-270.
- [10] ZHAO Z, SHI X Q. FM interference suppression for PRC-CW radar based on adaptive STFT and time-varying filtering [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(2): 219-223.
- [11] 陈文武, 蔡征宇, 陈如山. 基于 ASTFT 和中值滤波的 PRC-CW 雷达 FM 干扰抑制方法[J]. 南京理工大学学报, 2011, 35(2): 230-235.
CHEN W W, CAI ZH Y, CHEN R SH. FM interference suppression for PRC-CW radar based on ASTFT and median filtering [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011, 35(2): 230-235.
- [12] LI F Y, XU J, ZHANG X. Pulse jamming suppression for airborne radar based on joint time-frequency analysis [C]. IET International Radar Conference, 2013: 1-4.
- [13] 任明秋, 严革新, 朱勇, 等. 复杂电磁环境下雷达抗干扰性能测试方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1277-1282.
REN M Q, YAN G X, ZHU Y, et al. Study on radar anti-jamming performance test method in complex electromagnetic environment [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2016, 37(6): 1277-1282.
- [14] 陈磊, 陈殿仁, 刘颖. 一种新的线性调频脉冲信号参数估计算法[J]. 兵工学报, 2014, 35(2): 207-213.
CHEN L, CHEN D R, LIU Y. A new chirp signal parameter estimation algorithm [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(2): 207-213.
- [15] 曹伟浩, 姚直象, 夏文杰, 等. 基于插值短时分数阶傅里叶变换-变权拟合的线性调频信号参数估计[J]. 兵工学报, 2020, 41(1): 86-94.
CAO W H, YAO ZH X, XIA W J, et al. Parameter estimation of linear frequency modulation signal based on interpolated short-time fractional Fourier transform and variable weight least square fitting [J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(1): 86-94.
- [16] 徐舟, 张浩, 程水英. 未知包络多分量线性调频脉冲信号参数估计 [J]. 兵工学报, 2016, 37(3): 462-470.
XU ZH, ZHANG H, CHENG SH Y. Parameter estimation of unknown envelope multicomponent LFM signal [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(3): 462-470.

作者简介



胡泰洋(通信作者), 分别于 2006 年和 2012 年于南京理工大学获得学士和博士学位, 现为南京理工大学副研究员, 主要研究方向为微波毫米波探测技术。

E-mail: sun1983hu@126.com

Hu Taiyang (Corresponding author)

received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Nanjing University of Science and Technology in 2006 and 2012, respectively. He is currently an associate professor at Nanjing University of Science and Technology. His main research interests include microwave and millimeter-wave detection.