

doi: 10.7690/bgzdh.2014.03.013

## 基于回波互相关的拖引干扰抑制方法

张勇强, 伍岳, 张启

(电子科技大学电子工程学院, 成都 611731)

**摘要:** 针对 DRFM 拖引干扰机诱偏火控雷达的距离波门问题, 提出一种基于回波互相关的拖引干扰抑制方法。其主要步骤包括: 对典型的匀速拖引干扰和匀加速拖引干扰进行数学建模, 对包含目标回波和拖引干扰的雷达回波进行回波互相关, 对雷达回波的互相关函数依次低通滤波和逆回波互相关。仿真结果表明: 无论在匀速拖引干扰或匀加速拖引干扰环境下, 该方法都能较好地抑制拖引干扰。当信噪比大于 0 dB 时, 该算法干扰抑制深度比 IPMF 算法高 3~5 dB, 比 ICC 算法高 8~10 dB, 更加有效地抑制了拖引干扰, 从而使火控雷达的距离波门始终套住目标回波, 增加了武器的有效打击力。

**关键词:** 数字射频存储; 拖引干扰; 回波互相关; 低通滤波器; 逆回波互相关

**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

## Approach of Gate Pull-off Jamming Suppression Based on ECC

Zhang Yongqiang, Wu Yue, Zhang Qi

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science &amp; Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** According to the range gate of fire control radar controlled by the DRFM pull-off jammer, an approach of gate pull-off jamming suppression based on the echo cross-correlation (ECC) is proposed. The main steps are as follows. Firstly, mathematics modeling of gate pull-off jamming with constant velocity and acceleration (GPOJCV and GPOJCA) are investigated. Secondly, the cross-correlation function of radar echo is got by ECC, which contain target echo and GPOJCV (or GPOJCA). Thirdly, after the low-pass filtering, the inverse echo cross-correlation (IECC) of radar echo is obtained. Simulation results show that both in the GPOJCV and GPOJCA environment, the approach can suppress jamming well; When the signal-to-noise ratio (SNR) is greater than 0 dB, the signal-to-jamming ratio improving factor (SJR IF) of this algorithm has about 3~5 dB higher than IPMF, and about 8~10 dB higher than ICC, which suppresses gate pull-off jamming to the most. So the target echo is always in the range gate of fire control radar. Finally, it increase the effective force of arms.

**Keywords:** DRFM; gate pull-off jamming; ECC; low-pass filter; IECC

### 0 引言

雷达电子战通过采用专门的电子设备和器材对敌方雷达进行侦察、干扰、摧毁, 同时防护敌方对我方雷达进行侦察、干扰及摧毁。随着数字射频存储(digital radio frequency memory, DRFM)等技术的发展, 敌方对我方雷达有源欺骗干扰愈来愈相关。其中, 雷达有源拖引干扰<sup>[1-2]</sup>是干扰机针对雷达实施的一种典型的有源欺骗干扰。该干扰是一种周期地从质心干扰到假目标干扰的连续变化过程, 且能量比真目标强。最终, 干扰导致雷达的自动增益控制(automatic gain control, AGC)电路逐渐地套在能量较强的拖引干扰上, 使雷达跟踪失常。

为增强雷达的抗干扰能力, 国内外相关学者已做了大量的研究。顾海燕等<sup>[3-5]</sup>根据距离-速度联合干扰建模提取出了目标回波信号和干扰的霍夫分离度等参数, 根据所得参数识别目标和干扰, 并基于瞬时互相关(instantaneous cross-correlation, ICC)方法实现干扰的抑制, 但未对目标处于非匀速的情况进行讨论。罗双才等<sup>[6]</sup>基于盲源分离(blind source

separation, BSS)技术讨论了在单目标回波信号与单假目标干扰混合时的目标回波信号和干扰的分离, 根据低量化维数采样器<sup>[7]</sup>干扰特征剔除干扰, 但当采样量化位数较高时, 或目标处于密集编队飞行, 或干扰机采取多假目标干扰调制等欠定条件<sup>[8]</sup>时, 此方法却难以凑效。张勇强等<sup>[9]</sup>基于初相匹配滤波(initial phase matched filtering, IPMF)较好地削弱了有源欺骗干扰, 但当基于 DRFM 的干扰机转发准相参有源欺骗干扰时, 该方法失效。

根据上述研究现状和问题, 笔者提出基于回波互相关的雷达有源拖引干扰抑制算法, 可以有效地解决目标机动引起的干扰误判<sup>[3-5]</sup>, 也可以解决当采样量化位数较高<sup>[7]</sup>, 或被干扰雷达工作在欠定<sup>[8]</sup>条件时造成目标和干扰难以辨别, 或目标和干扰难以分离的问题, 同时还可以解决由 DRFM 干扰机转发的准相参的拖引干扰<sup>[9]</sup>, 进一步保证了雷达获取真目标信息的能力。

### 1 干扰模型

雷达为检测目标, 需要向责任区辐射电磁波。

收稿日期: 2013-10-14; 修回日期: 2013-11-07

基金项目: 横向合作项目

作者简介: 张勇强(1988—), 男, 四川人, 硕士研究生, 从事雷达有源干扰抑制技术研究。

不失一般性，设雷达发射波形为

$$s(t) = \text{rect}(t/T_p) \exp\{j[2\pi f_0 t + \varphi(t) + \varphi_0]\} \quad (1)$$

其中： $\text{rect}(\cdot)$ 代表矩形函数； $\varphi(t)$ 为雷达发射波形调制函数； $\varphi_0$ 为初相； $T_p$ 为脉冲重复周期。

责任区中的干扰机截获雷达发射波形，通过适当的时间延迟和频移，调制拖引干扰

$$J(t) = A_j s(t - \frac{2R_s}{C} - t_{dj}) \exp[2\pi(f_d + f_{dj})t] \quad (2)$$

其中： $A_j$ 为干扰的幅度； $R_s$ 为探测的目标与雷达的径向距离； $f_d$ 代表目标多普勒频率； $f_{dj}$ 和 $t_{dj}$ 分别代表拖引干扰调制时的频移和时间延迟； $C$ 为光在大气中的传播速度。

为了有效拖引雷达跟踪波门，使跟踪系统的速度或距离跟踪波门偏离真实的目标，其频移和时间延迟是相互制约的。当干扰为匀速拖引干扰时，其频移和时间延迟满足：

$$f_{dj} = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_1, \text{捕获期} \\ 2v_j / \lambda & t_1 \leq t \leq t_2, \text{拖引期} \\ \text{干扰关闭} & t_2 \leq t \leq T_j, \text{关闭期} \end{cases} \quad (3)$$

$$t_{dj} = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_1, \text{捕获期} \\ v_j(t - t_1) & t_1 \leq t \leq t_2, \text{拖引期} \\ \text{干扰关闭} & t_2 \leq t \leq T_j, \text{关闭期} \end{cases} \quad (4)$$

其中： $v_j$ 是干扰拖引速度； $T_j$ 为干扰拖引的周期。若将 $a_j$ 设为干扰拖引加速度，则当干扰为匀加速拖引干扰时，其频移和时间延迟满足

$$f_{dj} = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_1, \text{捕获期} \\ 2a_j(t - t_1) / \lambda & t_1 \leq t \leq t_2, \text{拖引期} \\ \text{干扰关闭} & t_2 \leq t \leq T_j, \text{关闭期} \end{cases} \quad (5)$$

$$t_{dj} = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_1, \text{捕获期} \\ a_j(t - t_1)^2 / 2 & t_1 \leq t \leq t_2, \text{拖引期} \\ \text{干扰关闭} & t_2 \leq t \leq T_j, \text{关闭期} \end{cases} \quad (6)$$

## 2 基于回波互相关的拖引干扰抑制方法

不难看出，当目标和雷达的径向距离为 $R_s$ 时，雷达目标回波为

$$S(t) = A_s s(t - \frac{2R_s}{C}) \exp(2\pi f_d t) \quad (7)$$

其中： $f_d$ 代表目标多普勒频率； $A_s$ 代表目标回波信号的幅度。在雷达跟踪系统的捕获时间内，拖引干扰需要将跟踪波门诱偏。因此，雷达回波为

$$x(t) = S(t) + J(t) \approx \begin{cases} (1 + A_j / A_s) S(t) & 0 \leq t \leq t_1, \text{捕获期} \\ J(t) + S(t) & t_1 \leq t \leq t_2, \text{拖引期} \\ S(t) & t_2 \leq t \leq T_j, \text{关闭期} \end{cases} \quad (8)$$

因此，拖引干扰诱偏跟踪波门始于拖引期，而其他阶段相当于没有干扰。当跟踪系统每次捕获目标时，干扰机需重新截获雷达发射波形，以便调制并转发一个完整周期的拖引干扰。将捕获期间的一个脉冲重复间隔的数据与雷达回波互相关，可以得到雷达回波互相关函数

$$R_x(t) = (S(t) + J(t)) \cdot [(1 + A_j / A_s) S(t)]^* \quad (9)$$

当干扰处于捕获期时，雷达回波互相关函数为

$$R_x(t) = [(1 + \frac{A_j}{A_s}) S(t)] \cdot [(1 + \frac{A_j}{A_s}) S(t)]^* = (A_s + A_j)^2 \text{rect}(t / T_p) \quad (10)$$

当干扰处于停拖期时，雷达回波互相关函数为

$$R_x(t) = S(t) \cdot [(1 + \frac{A_j}{A_s}) S(t)]^* = A_s (A_s + A_j) \text{rect}(t / T_p) \quad (11)$$

当干扰处于拖引期时，雷达回波互相关函数为

$$R_x(t) = [S(t) + J(t)] \cdot [(1 + \frac{A_j}{A_s}) S(t)]^* = A_s (A_s + A_j) \text{rect}(\frac{t}{T_p}) + [J(t) S^*(t) (1 + \frac{A_j}{A_s})] \quad (12)$$

其中若 $\varphi(t)$ 为 LFM 波形调制函数，则

$$J(t) S^*(t) = A_j A_s \text{rect}[\frac{t - 2R_s / C - t_{dj}}{T_p}] \text{rect}[\frac{t - 2R_s / C}{T_p}] \cdot \exp\{j[2\pi(f_{dj} - \mu t_{dj})t - \frac{1}{2} \mu t_{dj}^2 - 2\pi(f_0 + f_{dj})t_{dj}]\} \quad (13)$$

其中 $\mu$ 为线性调频斜率。若 $\varphi(t)$ 为二相编码波形调制函数，则

$$J(t) S^*(t) = A_j A_s \text{rect}[\frac{t - 2R_s / C - t_{dj}}{T_p}] \text{rect}[\frac{t - 2R_s / C}{T_p}] \cdot \chi(-t_{dj}, f_{dj}) \exp[j(2\pi f_{dj} t)] \quad (14)$$

其中

$$\chi(a, b) = e^{j\pi b [T_d - |a|]} \left[ \frac{\sin \pi b (T_d - |a|)}{\pi b (T_d - |a|)} \right] \frac{(T_d - |a|)}{T_d} \quad (15)$$

$T_d$ 为码元宽度。不难看出，无论发射波形为 LFM 信号或二相编码信号，拖引干扰的雷达回波互相关函数为非零频单频信号，而目标回波的雷达回波互相关函数则为零频信号。根据此项差异，将雷达回波的互相关函数进行傅里叶变换，然后进行低通滤波即可抑制拖引干扰。其干扰抑制流程如图 1 所示。定义信干比改善因子(干扰抑制深度)为

$$IF = \text{SJR}_o - \text{SJR}_i \quad (16)$$

其中： $\text{SJR}_o$ 代表干扰抑制输出信号的信干比； $\text{SJR}_i$ 代表干扰抑制输入信号的信干比。

图 1 给出了基于回波互相关的拖引干扰抑制流

程。其详细步骤如下。

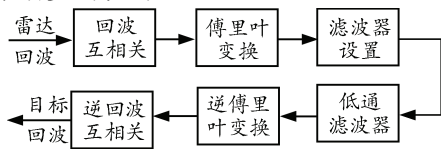


图 1 基于回波互相关的拖引干扰抑制流程

Step1: 取出雷达回波捕获期的一个脉冲重复周期数据,对雷达回波每个脉冲进行互相关得到  $R_x(t)$ ,如式 (9)~式 (12) 所示。

Step2: 对上述雷达回波每个脉冲的互相关函数  $R_x(t)$ 进行傅里叶变换,得频域的互相关函数  $R_x(\omega)$ 。

Step3: 根据式 (10)~式 (14),目标回波互相关函数的频谱中心为零,其 3 dB 带宽为  $1/T_p$ 。于是,基于脉冲重复周期  $T_p$  设置低通滤波器滤波宽度为  $2/T_p$ (减小目标回波滤波损失)。

Step4: 基于上述雷达回波互相关函数,采用上述低通滤波器滤波。

Step5: 对滤波后的雷达回波互相关函数  $R_x(\omega)$ 进行逆傅里叶变换,得到干扰抑制的雷达回波互相关函数  $R_x(t)$ 。

Step6: 根据干扰抑制的雷达回波互相关函数

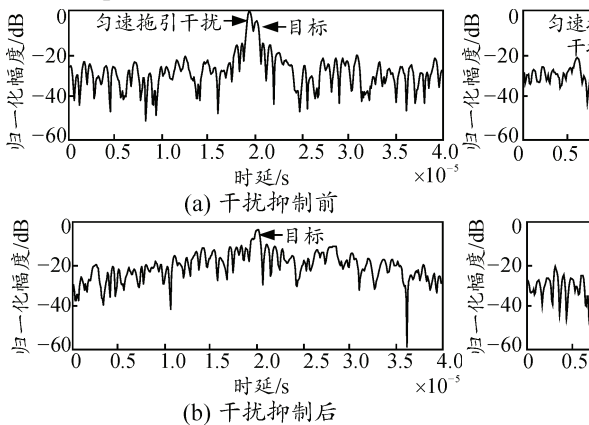


图 2 匀速(2e3m/s)拖引干扰下脉压信号

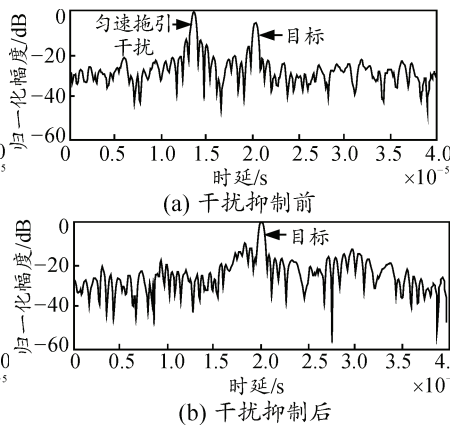


图 3 匀速(2e4m/s)拖引干扰下脉压信号

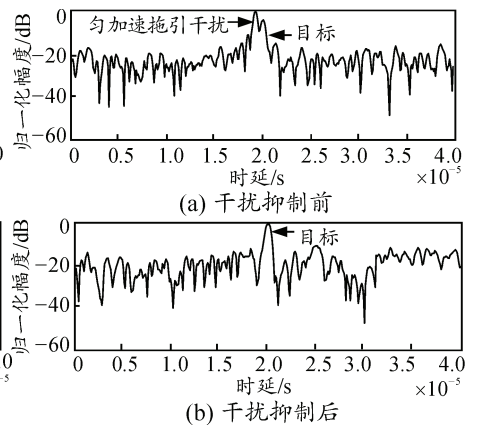


图 4 匀加速(9e4m/s<sup>2</sup>)拖引干扰下脉压信号

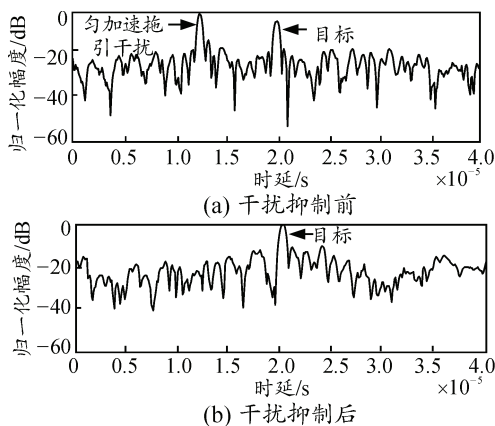


图 5 匀加速(9e5m/s<sup>2</sup>)拖引干扰下脉压信号

$R_x(t)$ , 进行逆回波互相关可得基于回波互相关的拖引干扰抑制的目标回波估计  $S(t)$ 。

### 3 仿真分析

设雷达发射波形为时宽 10  $\mu$ s, 中心频率 1 GHz 和带宽 2 MHz 的线性调频信号,其零中频信号采样点个数为 100 点。脉冲重复周期为 1 ms,完整拖引周期内脉冲数为 100 个。目标距雷达 100 km 处,并以 400 m/s 的速度奔向雷达。目标上的自卫式干扰机接收截获雷达脉冲信号,并转发如式 (2) 的匀速拖引干扰。其相对目标位置如图 2 和图 3 上半部分。雷达回波信号中,干信比和信噪比各为 6 dB 和 3 dB。图 2 和图 3 上半部分清晰地显示雷达回波某拖引期含有目标和干扰尖峰。经过干扰抑制后干扰尖峰幅度被削去 20 dB 左右,如图 2 和图 3 下半部分。

改变匀速拖引干扰为匀加速拖引干扰,且干信比和信噪比各为 3 dB 和 0 dB,目标以 200 m/s 的速度远离雷达,其他的参数不变。图 4 和图 5 上半部分清晰地显示雷达回波某一拖引期含有目标和干扰尖峰。经过干扰抑制后干扰尖峰幅度被削去 20 dB 左右,如图 4 和图 5 下半部分所示。

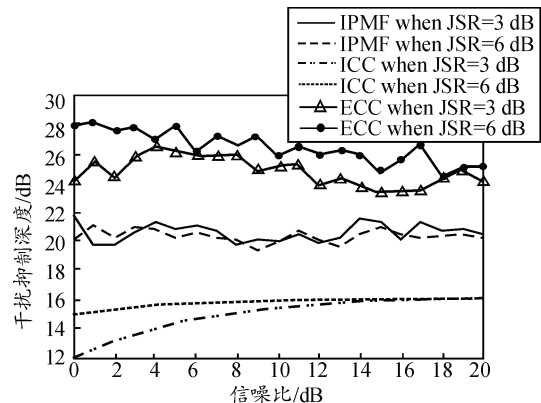


图 6 干扰抑制深度性能比较