

环境效应及防护

# 基于短时傅里叶变换的干扰信号识别方法

王程, 郑小燕, 王海彬

(机电工程与控制国家级重点实验室, 西安 710065)

**摘要:** **目的** 提高无线电引信识别欺骗式干扰的能力。**方法** 根据炮弹弹体自旋的特点, 使得采用连续波线性极化天线的无线电引信所收到的干扰信号呈现出有别于地面回波的周期性幅度调制特征, 通过对此特征进行短时傅里叶变换后进行识别, 可以作为无线电引信是否受到欺骗式干扰的判断依据。**结果** 通过仿真和试验对方法的可行性进行了验证, 表明该识别方法可以很好地提高连续波无线电引信的识别欺骗式干扰的能力。**结论** 基于短时傅里叶变换检测旋转调制的对地旋转弹无线电引信欺骗干扰识别的方法可以对干扰信号特征进行识别, 算法处理时间短, 能够作为引信是否受到干扰的一种判断依据。

**关键词:** 对地旋转弹; 无线电引信; 欺骗干扰识别; 短时傅里叶变换

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.03.014

**中图分类号:** TB332; V258

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)03-0067-04

## Interference Signal Recognition Method Based on Short-time Fourier Transform

WANG Cheng, ZHENG Xiao-yan, WANG Hai-bin

(National Key Laboratory of Electromechanical Engineering and Control, Xi'an 710065, China)

**ABSTRACT: Objective** To improve the ability of radio fuze to identify deception interference. **Methods** Due to characteristics of .missile spin, the interference signal of radio fuze received by using continuous wave linear polarization antenna received show periodic amplitude modulation characteristics different from ground echo. The characteristics were identified after short-time Fourier transform to be taken as the basis to determine whether radio fuse is subject to deception jamming. **Results** The feasibility of the method was verified by simulation and experiment. It showed that the recognition method can improve the ability of identifying the deceptive jamming of CW radio fuze. **Conclusion** The interference recognition method on ground rotating modulation rotary missile radio fuze based on short-time Fourier transform can identify characteristics of interference signal in short time of algorithm processing. It can be used as a judgement basis for whether the fuze is disturbed.

**KEY WORDS:** ground rotating artillery shell; radio fuze; deception jamming recognition; short-time fourier transform

面对复杂的战场电磁环境, 引信干扰技术和干扰设备不断更新发展, 对无线电引信的抗干扰能力提出了越来越高的要求<sup>[1]</sup>。现代战争中的复杂电磁环境以及各种人为的有源无源干扰, 特别是欺骗式干扰, 给引信的正常的工作带来了巨大的威胁<sup>[2]</sup>。

文献[3]采用互相关和正交投影方法抑制欺骗式干扰, 但需要很多的先验知识; 文献[4]基于盲分离算

法提出两种算法对欺骗式干扰信号进行抑制, 但算法较为复杂, 运算量较大; 文献[5]采用随机调频和盲分离的方法抑制干扰信号, 但该方法在量化位数高的情况下不能有效识别干扰信号。文中针对无线电引信对欺骗式干扰的识别困难、占用资源较多且抗干扰能力弱的问题, 提出了基于短时傅里叶变换的干扰信号识别方法。

## 1 无线电引信欺骗式干扰

弹箭无线电引信的干扰机理是干扰信号作用于引信接收部分,使其产生点火信号而使炮弹早炸,降低其毁伤效能。无线电引信抗干扰问题的实质是无线电引信对目标信号与干扰信号的识别以及有效抑制干扰信号的问题<sup>[6]</sup>。

地面多普勒信号主要是由地面反射信号和地面背景杂波叠加得到的。当地面起伏远小于工作波长时,可以认为地面反射为镜面反射。引信在工作时,随着弹体与目标逐渐接近,在时域上回波信号的幅度是增加的,具有增幅特性,并且弹体和目标越接近其增幅速率越高<sup>[7]</sup>。

无线电引信的有源干扰基本上分为压制式和欺骗式两类,其中压制式干扰通过阻塞、瞄准或扫频形式来实现。欺骗式干扰方法是模拟目标回波信号,在引信的目标探测或者信号处理系统中产生假目标,触发引信启动规则或者条件,从而导致提起爆战斗部前动作。对引信实施欺骗式干扰的特点是干扰机能够产生与回波信号特征一致的干扰信号,在引信天线到执行电路之前的所有环节产生与引信发射信号回波相同或相似的效果<sup>[8]</sup>。

## 2 短时傅里叶变换

短时傅里叶变换(STFT, Short-time Fourier Transform)也称加窗傅里叶变换,它是一种用局部频谱来表示信号频谱与时间关系的方法。其基本思路是用一个截断函数与时间信号相乘,该截断函数的时宽足够窄,使处理后的信号可以与平稳信号类似,对该段信号进行傅里叶变换,从而反映该时间段内信号中的频谱变化规律,如果让截断函数沿时间轴移动,可以得到信号随时间变化的规律<sup>[9]</sup>。

由于截断函数的时移特性,使得短时傅里叶变换具有既是时间函数又有频率函数的局部特性,而对于某一时刻的短时傅里叶变换,也就可以作为该时刻的“局部频谱”。因此,对目标信号直接采用STFT,就可以将多普勒表征出来。

STFT算法应根据信号处理的需要选择适当的截断函数,对截断函数内的信号进行离散傅里叶变换,再输出有效的信号时频特性。

## 3 基于短时傅里叶变换的干扰信号识别方法

一般采用收发一体的无线电探测器所采用的天线为线极化天线,这是由于若探测器采用同一副椭圆极化天线收发信号,其所发射的电磁波遇到目标所产

生后向散射波被天线接收后的信号功率小于采用线极化天线的探测器。在极端条件下,若探测器天线发射圆极化波正入射到无限大光滑到点平面目标,反射信号经天线接收后的功率理论上应为0,所以大部分收发一体的无线电引信均采用线极化天线<sup>[10]</sup>。

对于弹体在弹道运动中自旋的无线电引信来说,采用振子天线、微带贴片天线等天线的引信探测器天线的极化方向也会以弹轴为中心产生旋转,且旋转速度与弹体自旋速度相同。当引信受到外部欺骗式干扰时,探测器在弹道中所接收到的干扰信号将会受到极化调制,产生周期性的幅度调制。

通常情况下,地面回波由于地面粗糙度或植被等原因有很强的散射随机特性,而无线电信号能够穿透某些地表或植被表面,因此回波信号中的地面散射和内部折射叠加在一起,使地面散射回波更加复杂。在没有干扰的情况下,引信与地面交汇过程中,弹体旋转的同时还具有弹道方向的高速运动,产生的多普勒信号会强于由于天线极化调制产生的信号。同时由于地面强散射点的不规律性,引信天线旋转引起的极化调制特征会淹没在地面散射回波中,使其产生的调制难以从地面回波中分解出来,为干扰信号的识别提供了条件。

干扰机在远距离对引信进行干扰时,引信与地面的距离较远,因而地面散射回波信号极其微弱,甚至淹没在噪声中,所以引信所接收到的信号是纯粹的干扰信号。此时,引信接收到的干扰回波信号呈现出非常规律的由于弹体自旋而引起的自旋调制特征,通过对此特征的识别,可以有效判断出引信所接收到的信号为干扰信号而非真实的回波信号,因此可以避免引信受到欺骗而产生早炸现象,提高抗干扰能力。

对于弹体在弹道运动中高速自旋的引信来说,接收到的目标回波信号是一种非平稳信号,而短时傅里叶变换作为一种信号时域频域的分析方法,处理的信号主要是非平稳信号,所以这里用短时傅里叶变换对引信接收到的目标回波信号进行处理是一种可行、有效的方法。设定一个时间宽度很短的截断函数 $\gamma(t)$ ,并且这个截断函数在一定时间段内滑动,则信号 $x(t)$ 的短时傅里叶变换(STFT)定义为:

$$STFT_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} [x(t')\gamma(t'-t)]e^{-j2\pi ft'} dt' \quad (1)$$

正是由于截断函数的在某一段时间内移动的特性,使得短时傅里叶变换既具有时间函数的局部特性,又具有有频率函数的局部特性,而对于某一时刻 $t$ 的短时傅里叶变换 $STFT_x(t, f)$ ,也就可以作为该时刻的“局部频谱”。因此,对引信收到的目标回波信号直接采用STFT,是能够将该信号的多普勒特征解析出来的。

对于引信回波信号中的多普勒周期特征,可以用

序列相关函数来提取。一般情况下，弹体在弹道运动中高速自旋具有一定的周期性，因此，引信接收到的回波信号必然存在受到周期运动调制而产生的周期信号，而序列相关函数可以充分地描述该回波信号具有的周期信息。一个离散信号的序列相关函数可以定义为：

$$R_x(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x^*(n+k) \quad (2)$$

序列相关函数具有这样的性质：如果信号是以  $Q$  个抽样为周期的，则

$$R_x(k) = R_x(k+Q) \quad (3)$$

说明该周期信号的序列相关函数与其固有的周期相同。因此，对于一般的周期信号，若  $N > Q$ ，即信号的长度大于 1 个周期，则在抽样点为  $0, \pm Q, \pm 2Q, \dots$  处，其序列相关函数达到极大值。也就是说，可以不用考虑信号的起始时间，而直接确定序列相关函数的第一个最大值和次最大值的位置来达到估计周期的目的。若对该信号处理的采样频率为  $f_s$ ，序列相关函数最大值位于第  $F$  个采样点，次大值位于第  $P$  个采样点，则信号的周期估计值为：

$$\hat{T} = |F - P| / f_s \quad (4)$$

由以上分析可以看出，STFT 算法在多个估计周期内其自相关函数具有同一性，大大降低了算法的复杂度，缩短了算法处理时间，降低了算法所占用的资源。同时，由于弹体在自旋时极化特性的幅度调制具有很好的周期性，为 STFT 算法的自相关函数的选取提供参考依据。

通过采用 STFT 对受到干扰时的多普勒信号幅度调制周期规律的提取，将原信号成为离散的时间信号，在时间域内可进行包络提取、峰值检测等处理。

## 4 试验验证

为了验证该方法的可行性，首先通过仿真软件 ADS 与 Matlab 对地面多普勒回波信号和干扰信号进行了联合仿真，如图 1 所示。引信在高速自旋情况下在接近地面时的信号幅度特征如图 1 所示，该信号由于地杂波和地面强散射特性的存在，引信在接近地面时多普勒回波信号会与地杂波相叠加产生具有连续增幅特征的信号，该信号只有增幅和增幅速率特性，极化天线的调制特性是无法简单提取的。在加入极化调幅的欺骗式干扰信号后，回波信号如图 2 所示。该信号仍然具有增幅和增幅速率特性，在没有抗干扰识别机制时很容易被认为是地面回波而引发启动信号。该信号同时还具有周期性的幅度调制特征，这就可以作为判断引信是否接收到干扰信号的重要依据。

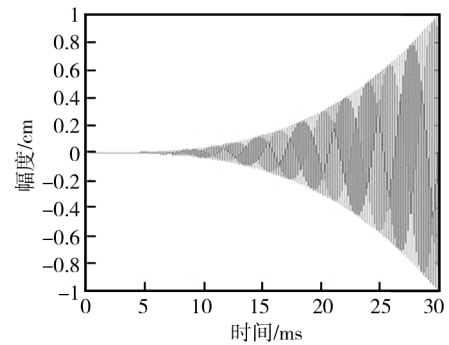


图 1 引信高速自旋时对地多普勒回波信号

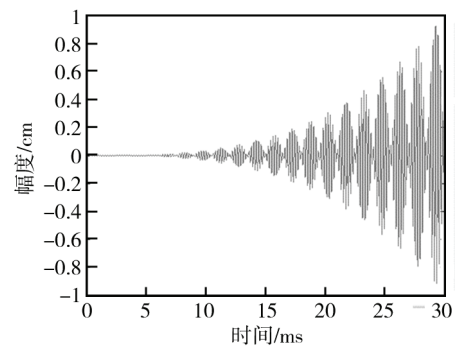


图 2 引信高速自旋时加入极化调幅的干扰的对地回波信号

为了进一步更直观地验证该方法，在微波暗室内采用半实物测试进行验证。将引信探测器放置在转台上，模拟弹体自旋。在距离探测器 20 m 处放置一金属角反射器模拟对地探测目标。将转台和探测器一起向金属角反射器推进，模拟弹目交汇过程，同时采集探测器输出信号，得到探测器未受到干扰时的中频输出信号，如图 3 所示。该信号只有幅度特征和增幅速率特征。

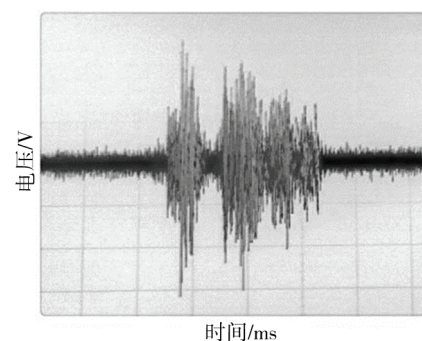


图 3 探测器未受到干扰时的中频信号输出波形

将金属板用标准喇叭天线替换，同时发射与探测器同频率的干扰信号，模拟引信受到欺骗式干扰时的干扰信号，重复上述试验。在引信射频前端接近喇叭天线的过程中，使射频前端在转台上垂直于运动方向进行旋转，用示波器检测引信输出信号，得到探测器受到干扰信号干扰时的中频信号输出信号，如图 4 所示。

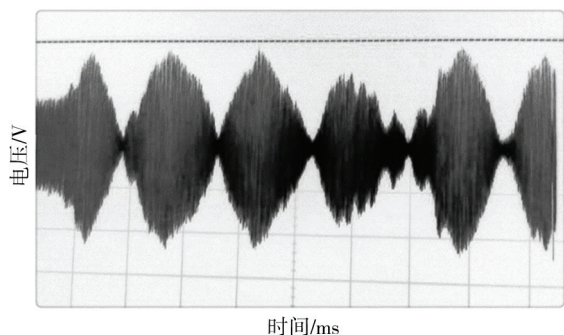


图4 探测器受到干扰信号干扰时的中频信号输出波形

对没有受到干扰时的探测器输出的信号进行相关的信号处理(如图5a所示)和受到干扰时的信号进行相关处理(如图5b所示)后,得到一种可以用来判断探测器是否受到干扰的判别方法。当探测器输出信号出现幅度逐渐增加的增幅特性时,引信未收到干扰;当探测器输出信号出现周期性的峰值信号时,可以判断探测器已经受到了欺骗式干扰,此时信号处理电路中的峰值检测电路持续输出幅度相近的大电压信号,引信可以由近炸改为触发模式。

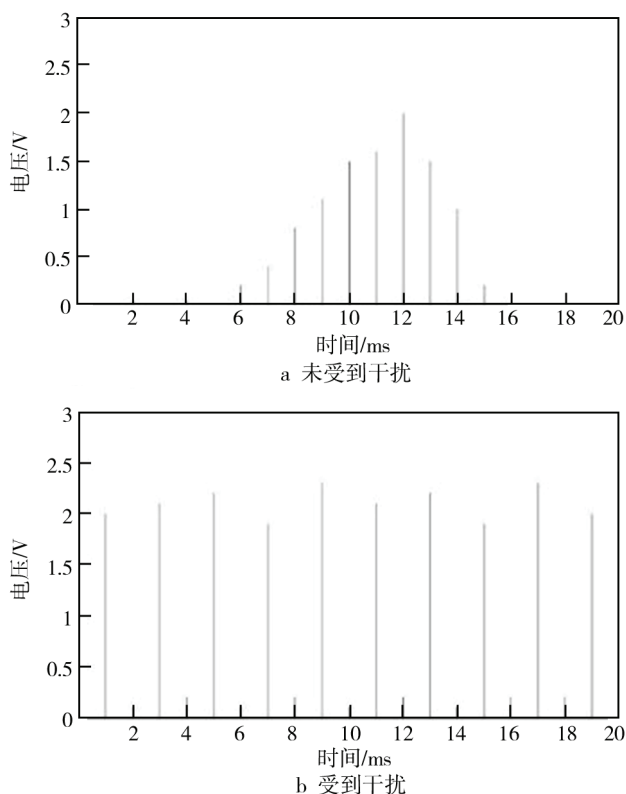


图5 经过STFT后识别信号

短时傅里叶变换可以通过可编程逻辑门阵列运算FPGA来实现,信号通过模数变换后经过FPGA内的寄存器延时,再通过蝶形单元根据运算规则进行处理。选用赛灵思公司的FPGA芯片来实现STFT,通

过数模仿真工具的仿真计算,快速傅里叶变换部分的资源约占整个芯片的28%,占用了很少的弹上资源,运算256点FFT所需时间只有80ns,运算速度快,符合引信工作时间短的特点。经过仿真模拟与半实物测试后,对具有自旋特性的无线电引信在受到欺骗式干扰时的周期现象进行了验证,对采用短时傅里叶变换对干扰信号的识别也进行了实现,表明该方法对干扰信号的识别有效,算法处理时间短,可以很好地提高无线电引信的抗干扰能力。

### 5 结论

文中提出了基于短时傅里叶变换检测旋转调制的对地旋转弹无线电引信欺骗干扰识别的方法。使用线极化的无线电引信探测器,在弹体自旋的情况下,受到欺骗式干扰时,探测器在弹道中所接收到的干扰信号将会受到极化调制,产生周期性的幅度调制。通过采用短时傅里叶变换对无线电引信的极化调制信号的时频特性的提取和识别,可以判断探测器是否受到了欺骗式干扰。模拟试验表明,该方法在引信受到干扰时,可以对干扰信号特征进行识别,算法处理时间短,能够作为引信是否受到干扰的一种判断依据。今后将改进信号处理算法方式,采用更加快速高效的计算方法,进一步缩短处理时间。

### 参考文献:

- [1] 向正义,王旬. 无线电近炸引信抗干扰方法[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(s1): 4-7.
- [2] 张旭东,郑世举,余德瑛. 国外无线电银杏干扰机的发展状况[J]. 制导与引信, 2004, 25(4): 22-24.
- [3] 张淑宁,赵惠昌. 伪码引信抗欺骗干扰的互相关正交投影联合法[J]. 南京理工大学学报, 2007, 31(4): 509-513.
- [4] 罗双才,唐斌. 一种基于盲分离的欺骗式干扰抑制算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12): 2801-2806.
- [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.
- [6] 钱龙,栗苹. 无线电引信电子对抗技术的三个层次[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(6): 127-130.
- [7] 乔飞,马秋华,付强,等. 基于有限分布参数的地面多普勒回波模型[J]. 探测与控制学报, 2010, 32(6): 5-7.
- [8] 刘源. 无线电引信实验干扰技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2009.
- [9] 赵地,王东营. 基于短时傅里叶变换测向技术[J]. 无线电工程, 2011, 41(10): 50-57.