http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0224

调频引信谐波时序检测抗干扰方法及实现

孔志杰，郝新红*，栗苹，闫晓鹏
（北京理工大学 机电动态控制重点实验室，北京 100081）

摘 要：针对调频(FM)引信抗干扰能力差的问题，提出了调频引信谐波时序检测抗干扰方法，利用弹目交会过程中谐波时序特征，提高了调频引信抗调幅(AM)、调频和扫频干扰能力；设计了基于快速傅里叶变换(FFT)的调频引信谐波提取方案，通过对差频信号进行FFT获得谐波幅值，与现有谐波定距调频引信通过带通滤波器(BPF)获得谐波幅值相比，在保证同等定距精度的前提下，可以灵活选取谐波次数和谐波通道，利用谐波时序性提高调频引信抗干扰能力，同时易于实现炸高分档。仿真及实测结果验证了本文方案的可行性，调频引信抗干扰成功率由16.7%提高到90%以上。

关 键 词：调频(FM)引信；抗干扰；谐波时序检测；快速傅里叶变换(FFT)；差频信号
中图分类号：TJ43^{+}4.1
文献标识码：A **文章编号**：1001-5965(2018)03-0549-07

调频(FM)引信是一种利用发射信号与回波信号的频率差确定目标距离的无线电引信，距离测量不依赖回波信号幅度，具有炸点散布小、定距精度高的优点。调频引信常用定距方法主要有谐波定距[1-2]和快速傅里叶变换(FFT)瞬时频率估计[3-4]2种。

现代战场上，调频引信处于中度或重度复杂电磁环境中，受到战场人为电子干扰和各种强背景噪声干扰的严重威胁[5-6]，调频引信静态抗干扰实验结果表明，扫频干扰下现有调频引信抗干扰成功率仅为16.7%。能否提高调频引信抗干扰能力是决定其战场生存能力的关键。

针对调频引信抗干扰研究，主要可归纳为基于发射信号设计[5-9]和基于信号处理[10-15]2个方向。基于发射信号设计研究的核心是提高引信发射信号的复杂度，但需要对现有调频引信射频电路进行重新设计；基于信号处理研究的核心是增加调频引信输出起爆控制信号可利用的信息特征，但不论是基于体目标特征[10-12]或是进行目标与干扰信号分类[13-15]都需要提取特征参量，算法相对复杂。

对调频引信差频信号和其包含的谐波信号分析可知，目标作用下调频引信差频信号包含的谐波信号峰值与弹目距离存在对应关系，且谐波次数越高，对应的弹目距离越远[16]。当弹目距离逐渐减小时，高次到低次谐波信号峰值依次出现，即谐波峰值存在时序性；而调幅(AM)、调频及扫频干扰作用下，引信差频信号不具有这种特性，只是表现为随机或偶发的在某(些)次谐波中出现峰值。因此，可以利用谐波时序性提高调频引信抗干扰能力。

谐波时序的检测依赖于谐波包络的获取，现有谐波定距调频引信通过带通滤波器(BPF)、二次混频获得谐波包络信号，滤波器设计直接影响

收稿日期：2017-04-13；**录用日期**：2017-06-05；**网络出版时间**：2017-09-04 15:08
网络出版地址：kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20170904.1508.002.html
基金项目：国防“973”计划(613196)；国家自然科学基金(61673066)
*通信作者. E-mail：haoxinhong@bit.edu.cn

引用格式：孔志杰，郝新红，栗苹，等. 调频引信谐波时序检测抗干扰方法及实现[J]. 北京航空航天大学学报，2018，44(3)：549-555. KONG Z J，HAO X H，LI P，et al. Harmonic timing sequence detection anti-jamming method and its implementation for FM fuze[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2018，44(3)：549-555 (in Chinese).

抑制干扰效果[17]。改变所选取的谐波次数需要重新设计滤波器及二次混频参考信号;采用多通道时,二次混频参考信号必须严格是调频的倍频,且采用数字信号处理时,多通道滤波器的设计严重耗用系统资源,降低单个滤波器性能;而基于 FFT 瞬时频率估计的调频引信获得的是一次 FFT 运算区间内能量最大的频率,没有利用谐波包络信息。

针对调频引信抗扫频干扰问题,本文提出了调频引信谐波时序检测抗干扰方法,通过同时比较多个通道谐波峰值出现时序及幅度信息作为调频引信输出起爆控制信号的判决条件;提出了基于 FFT 的调频引信谐波提取方法,通过对每个发射周期差频信号进行一次 FFT,获得每个发射周期各次谐波的幅值,从而实现基于多通道谐波时序检测的调频引信抗干扰方法。仿真及实测结果证明,本文方法有效提高了调频引信抗干扰能力,且实时性满足引信要求。

1 调频引信谐波时序检测抗干扰方法

以三角波信号为调制信号,调频引信发射信号 $S_t(t)$ 可以表示为

$$S_t(t)=\begin{cases}A\cos\left(2\pi\left[f_c+(4n+1)\Delta F\right]t-\pi\beta t^2\right) \\ \qquad nT\leqslant t\leqslant nT+\dfrac{T}{2} \\ A\cos\left(2\pi\left[f_c-(4n+3)\Delta F\right]t+\pi\beta t^2\right) \\ \qquad nT+\dfrac{T}{2}<t\leqslant(n+1)T\end{cases} \tag{1}$$

式中:A 为信号幅度;f_c 为信号载频;ΔF 为信号单边调制带宽;T 为调制信号周期,T 的倒数为调制信号频率 f_m;$\beta=4\Delta F/T=4\Delta F f_m$ 为信号调频率;n 为调制周期数。

简化的目标回波信号 $S_r(t)$ 可以表示为

$$S_r(t)=KS_t(t-\tau) \tag{2}$$

式中:K 为信号能量损耗因子;τ 为目标回波延迟时间。

一次混频参考信号与发射信号具有相同的表达式,只是信号幅度不同。设 A_1 为参考信号幅度,则参考信号 $S_1(t)=A_1S_t(t)$ 与目标回波信号混频后输出差频信号 $S_b(t)$ 可表示为

$$S_b(t)=\begin{cases}\dfrac{KAA_1}{2}\cos(2\pi\beta t^2-2\pi\beta\tau t-16\pi nt-2\pi[f_c-(4n-1)\Delta F]\tau+\pi\beta\tau^2) \\ \qquad nT\leqslant t<nT+\tau \\ \dfrac{KAA_1}{2}\cos(2\pi\beta\tau t-2\pi[f_c+(4n+1)\Delta F]\tau-\pi\beta\tau^2) \\ \qquad nT+\tau\leqslant t<nT+\dfrac{T}{2} \\ \dfrac{KAA_1}{2}\cos(2\pi\beta t^2-2\pi\beta\tau t-2\pi(8n+4)t+2\pi[f_c+(4n+1)\Delta F]\tau+\pi\beta\tau^2) \\ \qquad nT+\dfrac{T}{2}\leqslant t<nT+\dfrac{T}{2}+\tau \\ \dfrac{KAA_1}{2}\cos(2\pi\beta t+2\pi[f_c-(4n+3)\Delta F]\tau-\pi\beta\tau^2) \\ \qquad nT+\dfrac{T}{2}+\tau\leqslant t<(n+1)T\end{cases} \tag{3}$$

由式(3)可知,一个周期内差频信号由 2 个单频信号和 2 个调频信号组成。由于引信工作过程中 $\tau\ll T$,所以 2 段单频信号构成了差频信号的主要成分。

对一个调制周期内差频信号进行傅里叶变换,其频谱以调制信号角频率 $\Omega/(2\pi)$ 为间隔离散,表达式为

$$F_b(\omega,\tau)=\frac{1}{2}KAA_1\sum_n\left(k(m,\tau)\delta(\omega-m\Omega)\right) \tag{4}$$

式中:$\delta(\omega)$ 为单位冲击函数,ω 为角频率;$k(m,\tau)$ 为 2 段单频信号傅里叶级数,m 为谐波次数,其表达式为

$$k(m,\tau)=\begin{cases}\left(1-\dfrac{2\tau}{T}\right)\left|\left[\operatorname{sinc}\left((2\pi\beta\tau-2\pi mf_m)\left(\dfrac{T}{4}-\dfrac{\tau}{2}\right)\right)+\operatorname{sinc}\left((2\pi\beta\tau+2\pi mf_m)\left(\dfrac{T}{4}-\dfrac{\tau}{2}\right)\right)\right]\cdot\cos(2\pi f_c\tau)\right| & m\text{ 为偶数} \\ \left(1-\dfrac{2\tau}{T}\right)\left|\left[\operatorname{sinc}\left((2\pi\beta\tau-2\pi mf_m)\left(\dfrac{T}{4}-\dfrac{\tau}{2}\right)\right)-\operatorname{sinc}\left((2\pi\beta\tau+2\pi mf_m)\left(\dfrac{T}{4}-\dfrac{\tau}{2}\right)\right)\right]\cdot\sin(2\pi f_c\tau)\right| & m\text{ 为奇数}\end{cases} \tag{5}$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

由式(5)可知,m 次谐波幅值出现峰值时满足:

$$m = 8\Delta F \frac{R}{c} \tag{6}$$

式中:R 为弹目距离;c 为光速。

分析式(6)可知,目标作用下调频引信差频信号包含的谐波峰值与弹目距离存在对应关系,且谐波次数越高,对应的弹目距离越远。当弹目距离逐渐减小时,高次到低次谐波信号依次出现峰值,即谐波峰值存在时序性。时序检测可以通过峰值点检测、信号包络斜率检测等方法完成。

对于调幅干扰,干扰信号与引信本振混频后各次谐波能量不随时间改变,不存在各次谐波峰值依次出现规律;对于调频和扫频干扰,由于干扰信号与引信发射信号的弱相关性,干扰信号与引信本振混频后各次谐波能量分布较大且随时间随机改变,不满足各次谐波峰值时序要求。本文提出的调频引信谐波时序检测抗干扰方法可有效提高调频引信抗调幅、调频和扫频干扰的能力。

2　基于 FFT 的调频引信谐波时序检测实现

2.1　基于 BPF 的谐波包络提取

调频引信谐波时序检测抗干扰方法的一个重要步骤是提取谐波包络。现有谐波定距调频引信通过 BPF 获取谐波包络,原理框图如图 1 所示。

图 1 中虚线框内采用数字信号处理实现。使用 2 个 BPF,检测出差频信号中 m_p 和 m_p+2 次谐波信号,通过二次混频、包络检波提取谐波信号携带的多普勒信号。通过判断 m_p+2 次谐波通道多普勒信号先出现下降沿,m_p 次谐波通道多普勒信号后出现上升沿,同时检测两者时间间隔信息,判断回波信号是目标回波信号或是干扰信号。

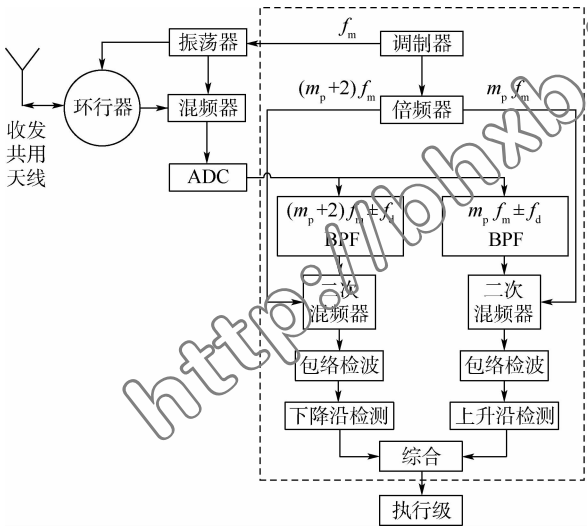


图 1　基于 BPF 的谐波包络提取原理框图

Fig. 1　Functional block diagram of BPF based harmonic envelope extraction

基于 BPF 的谐波包络提取需要设计 BPF 器及二次混频参考信号,更改选取的谐波次数时,需要重新设计滤波器及混频参考信号;使用多次通道谐波时序时,各通道二次混频参考信号需要严格是调频 f_m 的整数倍,对数字信号处理系统 DDS 要求较高,且受资源限制,实现多通道滤波会降低单个通道滤波器性能。

2.2　基于 FFT 的谐波包络提取

基于 FFT 的调频引信谐波时序检测抗干扰方法实现方案如图 2 所示。调制信号控制压控振荡器(VCO)生成调频信号,大部分能量作为发射信号经环行器和收发共用天线辐射;少部分能量作为混频器参考信号。发射信号经目标后向散射被引信天线接收,通过环行器输入混频器,与参考信号混频产生差频信号。差频信号经 ADC 采样进入数字信号处理器,进行 FFT 变换。提取 FFT 变换后频域中选定的各次谐波处的 FFT 值,以这些值代替各次谐波信号幅值并进行实时判决,当满足幅度条件和时序逻辑条件后,数字信号处理器输出点火信号输送至执行级。

与基于 FFT 瞬时频率估计的调频引信获得的是一次 FFT 运算区间内能量最大的频率不同,基于 FFT 的调频引信谐波时序检测抗干扰方法实现方案关注的是 FFT 运算后选定谐波的幅值,通过比较每个 FFT 区间选定次谐波幅值的变化规律,实现谐波时序检测。

基于 FFT 的调频引信谐波时序检测抗干扰方法只需要一次 FFT 就可获得对应时间段内各次谐波幅值,计算复杂度与 FFT 本身复杂度 $O(N\text{lb}\ N)$ 一致,N 为 FFT 点数。

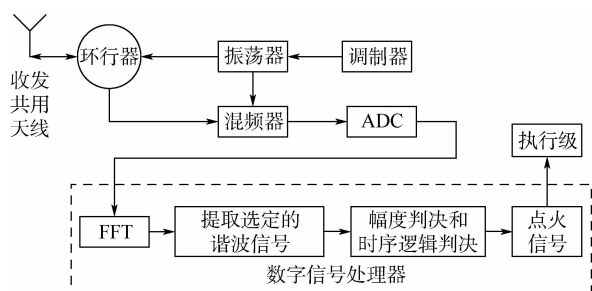


图 2　基于 FFT 的调频引信谐波时序检测抗干扰方法原理框图

Fig. 2　Functional block diagram of FFT based harmonic time sequence detection anti-jamming method for FM fuze

http://bhxb.buaa.edu.cn

2.2.1 定距性能分析

由式(5)可知,各次谐波幅度随距离变化类似于 sinc 函数形式,且第 m 次谐波在 $\tau = \frac{mf_m}{\beta} = \frac{m}{4\Delta F}$ 取得主瓣峰值,对应的主瓣宽度为 $\Delta\tau_{main} = \frac{1}{4\Delta F}$,距离分辨率为 $\Delta R = \frac{c}{8\Delta F}$,与现有调频谐波定距引信距离分辨率一致。

2.2.2 FFT 点数选取

调频引信通过谐波包络来获得距离信息,使用一个发射周期内差频信号的频谱特征,因此基于 FFT 的调频引信谐波时序检测抗干扰方法中,FFT 长度至少包含一个发射周期内的差频信号。同时,为了减小多普勒频率 f_d 对谐波信号提取的影响,FFT 的分辨率应远大于多普勒信号频率,即

$$\frac{f_s}{f_d} > N \geqslant \frac{f_s}{f_m} \tag{7}$$

式中:f_s 为 ADC 采样频率。

3 验证与讨论

3.1 定距性能验证

3.1.1 定距性能仿真及实测验证

通过 MATLAB 仿真获取动态差频信号,对其进行 FFT,提取各谐波包络。与基于 BPF 的谐波包络提取方法对比,验证本文方法的定距性能和谐波时序检测性能。

仿真参数如下:载频为 X 波段,调频 f_m = 100 kHz,调制带宽 $\Delta F = \pm 50$ MHz,弹目距离为 15 ~ 1 m,弹目接近速度为 500 m/s,ADC 采样率为 4 MHz,FFT 点数为 128。在信噪比(SNR)为 −10 dB输入下,基于 BPF 的谐波包络提取方法和基于 FFT 的谐波包络提取方法 2、4、6、8 次谐波通道输出信号随弹目距离变化规律如图 3(a)、(b)所示,图 4 给出了2 种方法包络对比。

由图 4 可知,基于 FFT 的谐波包络提取方法与基于 BPF 的谐波包络提取方法获得的 2、4、6、8 次谐波包络基本一致,且峰值点对应的弹目距离相同,与理论分析一致。在获得多通道谐波包络的前提下,可以通过下降沿、上升沿检测进行时序判断。

按照仿真参数设计基于 FFT 的调频引信谐波时序检测抗干扰方法原理样机,在微波暗室进行低速(1 m/s)模拟相向交会测试,实验场景示意图如图 5 所示。将金属平板目标垂直固定在移动小车上,原理样机置于轨道一端,天线位置与金属平板目标中心平齐,小车以 1 m/s 速度沿轨道由远及近运动。由于实验场地交会距离限制,采集样机 4、6、8 次谐波输出信号。

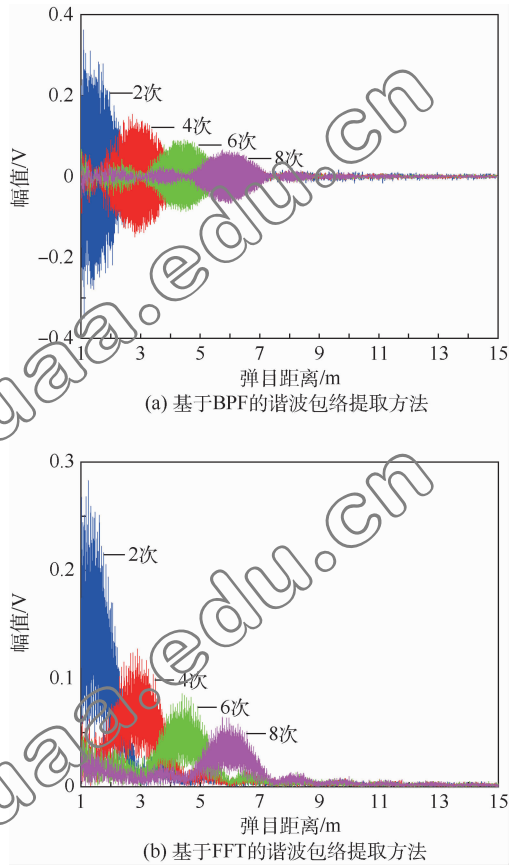


图 3 2 种方法的 2、4、6、8 次谐波通道多普勒输出信号(SNR = −10 dB)

Fig. 3 Output signal of the 2nd,4th,6th,8th harmonic channel Doppler of two methods (SNR = −10 dB)

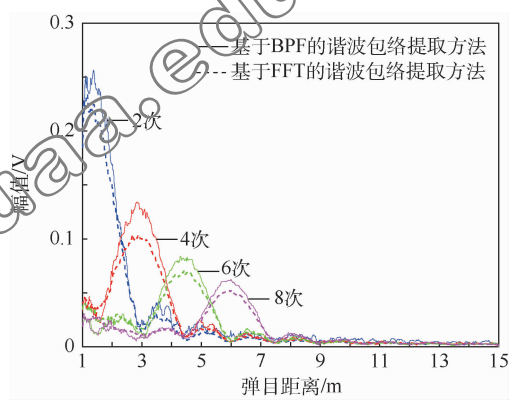


图 4 2 种方法的 2、4、6、8 次谐波包络输出信号(SNR = −10 dB)

Fig. 4 Output signal of the 2nd,4th,6th,8th harmonic channel envelope of two methods (SNR = −10 dB)

实际测得的 4、6、8 次谐波信号幅度曲线如图 6所示。载有平板模拟目标的小车运动起始位置距样机天线10.5 m,以1 m/s速度向样机靠近。

http://bhxb.buaa.edu.cn

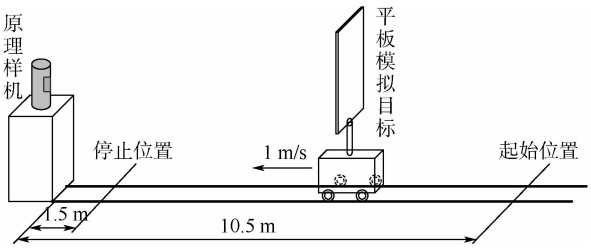


图 5　原理样机低速交会场景示意图

Fig. 5　Schematic of low-speed intersection experiment for principle prototype

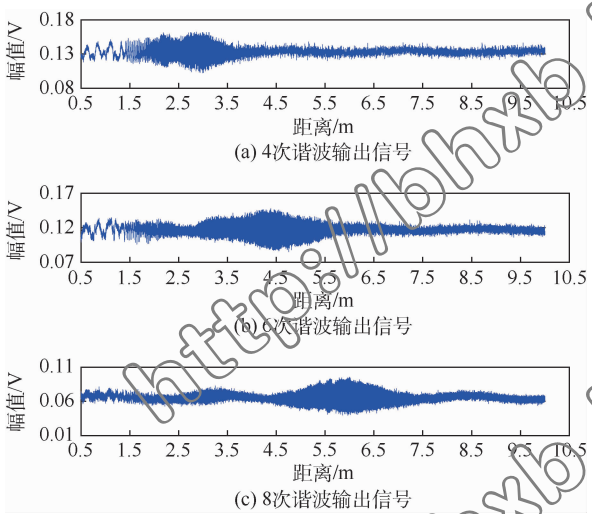


图 6　实测 4、6、8 次谐波幅度曲线

Fig. 6　Actual amplitude curves of the 4th,6th,8 th harmonics

实测结果表明,8 次谐波在 6 m 处出现峰值,6 次谐波在 4.5 m 处出现峰值,4 次谐波在 3 m 处出现峰值,与式(6)理论计算结果一致。小车在距样机 2 m 处开始减速,最终停止在距样机 1.5 m 处,制动过程中平板目标抖动造成 4 次谐波 1.5 ~ 2 m 处信号的异常,小车停止后平板模拟目标抖动造成 0 ~ 1.5 m 处信号异常。通过对图 6 所示的 4、6、8 次谐波进行幅值和时序判断,决定样机是否输出起爆控制信号。实测结果验证了基于 FFT 的调频引信谐波时序检测抗干扰方法的可行性。

3.1.2　算法复杂度分析

以 4、6、8 次谐波时序检测原理样机实现为例,分析基于 FFT 的调频引信谐波时序检测抗干扰方法的复杂度,如表 1 所示。

采用可编程逻辑门阵列(FPGA)进行 FFT,系统时钟为 50 MHz 时,128 点 FFT 需要时间为 μs 级,满足引信实时性要求。

3.2　抗干扰性能验证

通过仿真及静态抗干扰实验对基于 FFT 的调频引信谐波时序检测抗干扰方法进行抗干扰性能验证。对调频引信干扰最大的调幅扫频干扰下,基于 FFT 的调频引信谐波时序检测抗干扰方法 4、6、8 次谐波输出信号如图 7所示。

调幅扫频干扰下,在扫频驻留时间内调频引信差频信号恒定,各次谐波能量恒定;在不同扫频点上,各次谐波能量变化与扫频步进相关,不满足弹目交会过程中各次谐波能量变化规律,不能同时满足调频引信谐波时序检测抗干扰方法的幅度条件和时序逻辑条件。

按照调频引信静态抗干扰实验干扰参数,分别随机产生调幅干扰、调频干扰、扫频干扰和调幅扫频干扰,进行 2 000 次仿真实验。仿真结果表明,基于 FFT 的调频引信谐波时序检测抗干扰方法抗干扰成功率为 95.5%;使用相同干扰参数,对样机进行 1 000 次静态抗干扰实验,样机抗干扰成功率为 91.3%。证明了基于 FFT 的调频引信谐波时序检测抗干扰方法的有效性。

表 1　复杂度分析

Table 1　Complexity analysis

指　标	数　值
DDS 个数	0
点数	128
乘法次数	540
加法次数	540

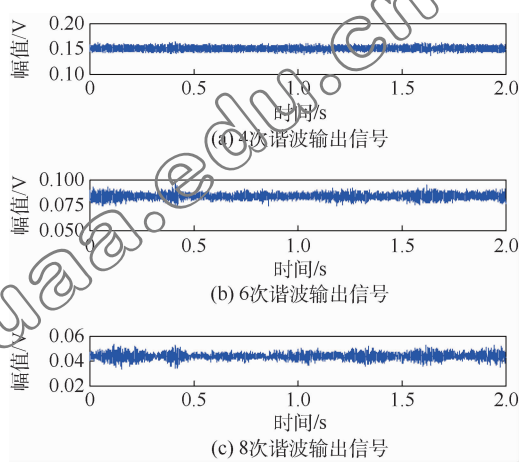


图 7　调幅扫频干扰下 4、6、8 次谐波幅度曲线

Fig. 7　The 4th,6th,8th harmonic amplitude curves under AM-sweeping jamming

4　结　论

1) 弹目交会由远及近过程中高次到低次谐波信号依次出现峰值,可以利用谐波时序检测提高调频引信抗干扰能力,且不需要改变现有调频引信硬件结构。

2) 基于 FFT 的谐波包络提取方法可以实现在通过一次 FFT 运算获得每个发射周期各次谐

http://bhxb.buaa.edu.cn

波的幅值,简化系统数字信号处理复杂度,且可以灵活选取谐波次数及个数。

3)仿真及实测结果验证了本文方法在保证定距性能与现有调频引信一致的前提下,抗干扰成功率由16.7%提高到90%以上。

参考文献(References)

[1] CHOI J H, JANG J H, ROH J E. Design of an FMCW radar altimeter for wide-range and low measurement error[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2015, 64(12): 3517-3525.

[2] CHOI J H, JANG J H, LEE J H, et al. Implementation of signal processing algorithms for an FMCW radar altimeter[J]. The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, 2015, 26(6): 555-563.

[3] ANGHEL A, VASILE G, CACOVEANU R, et al. Short-range wideband FMCW radar for millimetric displacement measurements[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2014, 52(9): 5633-5642.

[4] JIANG Y, DENG B, WANG H, et al. An effective nonlinear phase compensation method for FMCW terahertz radar[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(15): 1684-1687.

[5] RAO G N, SASTRY C V S, DIVAKAR N. Trends in electronic warfare[J]. IETE Technical Review, 2015, 20(2): 189-150.

[6] SIMONE F. Fuzing challenges for guided ammunition[C]// 59th Annual Fuze Conference. Washington, D. C.: NDIA, 2016: 1-6.

[7] 李明孜,赵惠昌. 基于FM-AM转换的伪码调相-载波调频复合引信信号的脉内特征提取研究[J]. 宇航学报, 2007, 28(1): 113-117.
LI M Z, ZHAO H C. The study on in-pulse characteristics extraction of pseudo code phase modulation-carry frequency modulation combined fuse signal based on the FM-AM transduction analysis[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(1): 113-117(in Chinese).

[8] TU Y, SI C, WU W. Pseudo-random frequency hopping fuze technology based on signal reconstruction[J]. IET Signal Processing, 2016, 10(3): 302-308.

[9] 岳凯,郝新红,栗苹,等. 基于分数阶傅里叶变换的线性调频引信定距方法[J]. 兵工学报, 2015, 36(5): 801-808.
YUE K, HAO X H, LI P, et al. Research on ranging method for linear frequency modulation radio fuze based on fractional Fourier transform[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(5): 801-808(in Chinese).

[10] MAX P. New generation naval artillery multi-function fuze[C]// 56th Annual Fuze Conference. Washington, D. C.: NDIA, 2012: 1-20.

[11] 肖泽龙,张恒,董浩,等. 多普勒对空引信回波分析及碰炸优先判决准则研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(10): 1820-1827.
XIAO Z L, ZHANG H, DONG H, et al. Research on modeling and simulation of echo signal of pulse Doppler fuze and judgment criterion of its impact[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(10): 1820-1827(in Chinese).

[12] MAX P. Proximity sensor technologies application to new munitions[C]// 58th Annual Fuze Conference. Washington, D. C.: NDIA, 2015: 1-19.

[13] LI Z Q, HAO X H, CHEN H L, et al. Target signal recognition for CW Doppler proximity radio detector based on SVM[C]// International Conference on Mechatronic Sciences. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2013: 1160-1163.

[14] 张彪,闫晓鹏,栗苹,等. 基于支持向量机的无线电引信抗扫频式干扰研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(4): 635-640.
ZHANG B, YAN X P, LI P, et al. Research on anti-frequency sweeping jamming of radio fuze based on support vector machine[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(4): 635-640(in Chinese).

[15] 黄莹,郝新红,孔志杰,等. 基于熵特征的调频引信目标与干扰信号识别[J]. 兵工学报, 2017, 38(2): 254-260.
HUANG Y, HAO X H, KONG Z J, et al. Recognition of target and jamming signal for FM fuze based on entropy features[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(2): 254-260(in Chinese).

[16] 梁远,刘芒龙,周祖国. 基于脉内调频的无线电引信信号处理方法[J]. 探测与控制学报, 2014, 36(2): 27-30.
LIANG Y, LIU M L, ZHOU Z G. Intra-pulse FM method of radio fuze signal processing[J]. Journal of Detection & Control, 2014, 36(2): 27-30(in Chinese).

[17] 左环宇,郝新红,岳凯. 调频多普勒引信抗调幅干扰性能分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(10): 2163-2170.
ZUO H Y, HAO X H, YUE K. Anti-AM jamming performance of FM Doppler fuze[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(10): 2163-2170(in Chinese).

作者简介:

孔志杰 男,博士研究生。主要研究方向:引信信号处理与抗干扰技术。

郝新红 女,博士,副教授,博士生导师。主要研究方向:中近程探测及控制技术、引信抗干扰技术。

栗苹 女,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:信息感知与对抗、智能探测与控制技术。

闫晓鹏 男,博士,副教授,博士生导师。主要研究方向:电子对抗技术、引信干扰技术。

http://bhxb.buaa.edu.cn

Harmonic timing sequence detection anti-jamming method and its implementation for FM fuze

KONG Zhijie, HAO Xinhong*, LI Ping, YAN Xiaopeng

(Science and Technology on Electromechanical Dynamic Control Laboratory, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to improve the anti-amplitude-modulation (AM)-jamming, anti-frequency-modulation (FM)-jamming and anti-sweep-jamming performance of FM fuze, a harmonic timing sequence detection anti-jamming method is proposed using the timing sequence characteristics of harmonics during the projectile-target encounter. A harmonic extraction method based on fast Fourier transform (FFT) is designed, and the harmonic amplitude is obtained by FFT on the difference frequency signal. Compared with the harmonic extraction method through the band-pass filter (BPF) of the existing FM harmonic fuze, the harmonic number and harmonic channel can be flexibly selected, under the condition of the same ranging precision. The better anti-jamming performance and flexible ignition height are achieved using the harmonic timing sequence detection. Simulation and experimental results verify the feasibility of the program and the anti-jamming success rate of FM fuze is improved from 16.7% to more than 90%.

Keywords: frequency-modulation (FM) fuze; anti-jamming; harmonic timing sequence detection; fast Fourier transform (FFT); difference frequency signal

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2017-04-13; **Accepted**: 2017-06-05; **Published online**: 2017-09-04 15:08

URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20170904.1508.002.html

Foundation items: National Security Program on Key Basic Research Project of China (613196); National Natural Science Foundation of China (61673066)

* **Corresponding author**. E-mail: haoxinhong@bit.edu.cn