

文章编号: 2095-4980(2016)01-0064-05

## 基于数字干扰合成的伪码调相引信干扰

袁汉钦<sup>1</sup>, 隋 鉴<sup>2</sup>

(1.海军驻合肥地区军事代表室, 安徽 合肥 230001; 2.91604 部队, 山东 龙口 265701)

**摘 要:** 为提高对伪码调相引信的干扰效果, 提出了基于数字干扰合成(DJS)的数字多时延干扰信号合成方法, 该方法可以极大提高干扰伪码调相引信的干扰效率。理论分析与仿真实验表明, 该方法合成的干扰信号能产生不同时延的多假目标的干扰效果, 兼具有欺骗干扰和压制干扰的效果, 能够使干扰自动对准引信的频带并获得脉冲压缩处理增益, 提高干扰能量的利用率。

**关键词:** 伪码调相; 数字干扰合成; 数字射频存储器; 灵巧噪声; 干扰

中图分类号: TN974

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201601.0064

## Jamming based on Digital Jamming Synthesis against pseudo random code phase modulation fuze

YUAN Hanqin<sup>1</sup>, SUI Jian<sup>2</sup>

(1.The Navy Military Agent in Hefei, Hefei Anhui 230001, China; 2.Unit 91604, Longkou Shandong 265701, China)

**Abstract:** The digital multi-delay smart jamming based on Digital Jamming Synthesis(DJS) is proposed in order to improve the jamming capability against pseudo random code phase modulation fuze. This method could improve the effectiveness of jamming against the pseudo random code phase modulation fuze. Theoretical analysis and experimental research demonstrate that this method can produce multiple false targets with different time delays, which has both deception and blanket jamming effects. This method can make the jamming frequency in accordance with the frequency band of fuze, and the jamming signal can acquire pulse compress gain of fuze. It can make use of the jamming energy efficiently.

**Key words:** pseudo random code phase modulation; Digital Jamming Synthesis; Digital Radio Frequency Memories(DRFM); smart noise; jamming

伪码调相引信<sup>[1-2]</sup>是一种利用伪随机序列的自相关函数具有类似白噪声相关函数随机特性工作的引信。伪随机码的随机性和尖锐相关函数, 使其具有良好的距离分辨能力、抗干扰能力和尖锐的距离截止特性等优点, 其优良的性能使其在无线电引信中得到广泛应用<sup>[3]</sup>, 对伪码调相引信干扰的研究是目前无线电引信电子对抗研究的一个热点。传统的噪声干扰在对抗伪码调相引信时干扰效果大幅降低<sup>[4]</sup>, 为了使干扰信号获得同信号类似的脉冲压缩处理增益, 本文提出了一种基于数字干扰合成(DJS)<sup>[5]</sup>的伪码调相引信干扰技术, 以产生具有强针对性的相干干扰信号, 极大提高干扰效率。

### 1 基于 DJS 的数字多时延干扰技术

#### 1.1 数字干扰合成技术的基本原理

数字干扰波形合成是高速数字电路和数字信号处理相结合的产物, 其主要原理是在满足采样定理的前提下, 利用基带采样数据合成需要的干扰信号。针对引信对抗的要求, 本文设计的基于 DJS 的引信干扰系统的基本原理框图见图 1。该系统的以数字射频存储器(DRFM)<sup>[6-7]</sup>为核心, 通过将截获的引信发射信号下变频后, 经 DRFM 转换为基带正交采样数据并进行存储, DRFM 中的采样数据可以保证干扰信号的相干性及高保真度。正交采样数据在系统控制下读入系统的数据缓存器中, 数据缓冲进行相关的调制, 并将合成的基带数字干扰波形数据进行存储, 在电子支持模式系统的控制下, 在合适的干扰时间内将存储器中保存的基带数字波形读出, 经 DAC 后并上

收稿日期: 2014-11-24; 修回日期: 2015-07-09

变频<sup>[8]</sup>，形成需要的射频干扰信号。

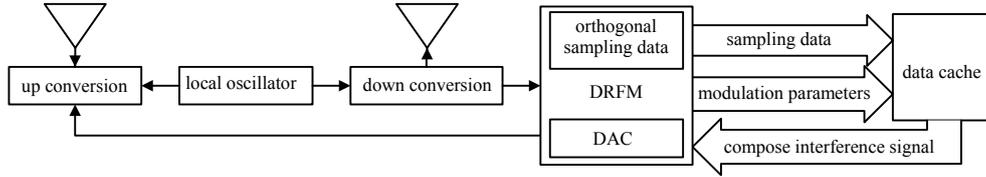


Fig.1 Principle diagram of digital interference synthesis system

图 1 数字干扰合成系统原理框图

### 1.2 合成的数字多时延干扰信号

引信干扰系统截获引信发射信号的基带采样数据为  $s(n) = I(n) + jQ(n)$ ，其中  $I(n)$  为采样的同向分量， $Q(n)$  为采样的正交分量。将采样数据通过不同抽头延迟输出，并分别进行加权处理得到合成的干扰基带采样  $J(n)$  为：

$$J(n) = \sum_{i=0}^{N-1} A_i s(n-i) = \sum_{i=0}^{N-1} A_i [I(n-i) + jQ(n-i)] \quad (1)$$

式中  $A_i$  为延迟抽头加权系数，采用不同的加权系数可以获得不同目标起伏效果。

经 DAC 后，经本振混频后输出的射频干扰信号  $J(t)$  为：

$$J(t) = \sum_{i=0}^{N-1} A_i [I(t-it_s) + jQ(t-it_s)] \exp(j\omega_0 t) = \sum_{i=0}^{N-1} A_i s(t-it_s) \exp(j\omega_0 t) \quad (2)$$

式中： $t_s$  为延迟抽头的延迟步长； $\omega_0$  为载波角频率。式(2)说明合成的干扰信号是引信发射信号的不同延迟后进行加权叠加的结果。伪码调相引信获得脉内相干处理增益的方法通常是采用匹配滤波，合成的干扰信号经过匹配滤波器后的输出信号  $s_o(t)$  为：

$$s_o(t) = s_j(t) * h(t) = \sum_{i=0}^{N-1} A_i s(t-it_s) \exp(j\omega_0 t) * h(t) = \sum_{i=0}^{N-1} A_i y(t-it_s) \quad (3)$$

式中： $s_j(t)$  为接收干扰信号； $h(t)$  为引信接收机的匹配滤波器的冲击响应； $y(t) = s_r(t) * h(t)$  为当输入为引信回波信号时匹配滤波器的输出， $s_r(t)$  为接收回波信号。由式(3)可以看出合成的干扰信号经匹配滤波后的输出由多个分量加权叠加构成，且能够获得脉冲压缩处理增益，能够形成不同时延的假目标。如果加权系数  $A_i$  采用数字噪声序列，那么多时延灵巧噪声就能在更小的干扰功率下获得相同的压制干扰效果。

根据雷达方程可知，引信接收的目标回波信号功率  $P_s$  为：

$$P_s = \frac{P_t G_t^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L_r} \quad (4)$$

式中： $P_t$  为发射峰值功率； $G_t$  为引信发射天线增益； $\sigma$  为目标的散射截面积； $\lambda$  为引信发射信号的波长； $R$  为引信作用距离； $L_r$  为引信系统损耗。

引信系统为了从干扰和系统噪声中提取有用信号，必须采用一定的信号处理手段，使引信信号获得一定的信号处理增益，提高引信接收机输出端的信噪比，因此引信接收机输出端的信号功率  $P_{so}$  为：

$$P_{so} = \frac{P_t G_t^2 \sigma \lambda^2 D_n}{(4\pi)^3 R^4 L_r} \quad (5)$$

式中  $D_n$  为引信的信号处理增益，是引信对接收信号进行匹配滤波、相干积累等信号处理方法后，接收信号相对于噪声干扰信号所获得的处理增益。 $D_n$  根据引信所采用的具体体制和信号处理方法可以有不同的取值。伪随机码调相引信主要通过采用相关处理的方法，进行噪声抑制提高输出信噪比，以提高引信的抗干扰能力，其处理增益可表示为  $D_n = BT$ ，其中  $B$  为伪码调相信号的带宽， $T$  为伪随机码的周期。

当采用噪声干扰方式时，引信接收的有效噪声功率  $J$  为：

$$J = \frac{P_j G_j G_i^* K_j}{L_j} \left( \frac{\lambda}{4\pi R_j} \right)^2 \quad (6)$$

式中： $P_j$  为干扰机峰值功率； $G_j$  为干扰机天线增益； $G_i^*$  为引信天线在干扰信号方向上的天线增益； $K_j = B_s/B_j$  为干扰信号的带宽失配系数， $B_s$  为引信接收机带宽， $B_j$  为干扰信号带宽； $L_j$  为实施干扰的损耗； $R_j$  为干扰机到引信的距离。

在压制干扰中,通常虚警概率为  $10^{-6}$  时,概率下降 10%,此时认为干扰能够有效压制真实目标<sup>[9]</sup>。在不考虑脉冲积累的情况下,可以得到对应的信干比为 9 dB,此时需要的干扰机的功率  $P_j$  为:

$$P_j = \frac{P_{so} L_j}{8 G_j G_t^* K_j} \left( \frac{4\pi R_j}{\lambda} \right)^2 = \frac{P_t G_t^2 \sigma D_n L_j R_j^2}{32\pi R^4 L_t G_j G_t^* K_j} \quad (7)$$

多时延灵巧噪声的时延间隔  $t_s$  通常小于引信的脉冲重复周期,因此干扰机的功率将被分配到各个干扰分量,此时可考虑利用平均功率表示每个干扰分量获得的功率。由于多时延灵巧噪声的干扰分量同引信信号保持相干,因此能够获得引信的信号处理增益,此时多时延灵巧噪声干扰信号在引信接收机输出端的平均功率  $J_d$  为:

$$J_d = \frac{P_{jd} G_j G_t^* D_n}{N L_j} \left( \frac{\lambda}{4\pi R_j} \right)^2 \quad (8)$$

式中:  $P_{jd}$  为干扰机的输出功率;  $N$  是延迟分量个数。

考虑多时延灵巧干扰信号对引信产生同样的干扰效果,此时需要的干扰功率为:

$$P_{jd} = \frac{P_{so} N L_j}{8 G_j G_t^* D_n} \left( \frac{4\pi R_j}{\lambda} \right)^2 = \frac{N P_t G_t^2 \sigma L_j R_j^2}{32\pi R^4 L_t G_j G_t^*} \quad (9)$$

因此噪声干扰与多时延灵巧噪声所需的干扰功率关系可以表示为:

$$\frac{P_j}{P_{jd}} = \frac{D_n}{N K_j} \quad (10)$$

对于伪码调相引信其信号处理增益能够达到 30 dB 以上,故  $D_n$  通常大于  $N K_j$ ,因此在同样干扰效果下多时延灵巧干扰所需的干扰功率要小于噪声干扰。

## 2 仿真分析

为了验证基于 DJS 合成的数字多时延干扰信号的可行性和干扰效果,设计了仿真实验进行了相关验证。图 2 给出了  $m$  序列二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)信号的波形和频谱,其中  $m$  序列长度 31 位,脉冲宽度 124  $\mu$ s,可见通过伪码 BPSK 调制可使信号的频谱得到展宽,提高了抗干扰能力。应用基于 DJS 合成的数字多时延干扰信号的时域和频域形状见图 3,这种干扰信号在时域上具有明显的似噪声特性,在频域则与信号具有极相似的频谱结构,能够自动在频率上对准被干扰引信。

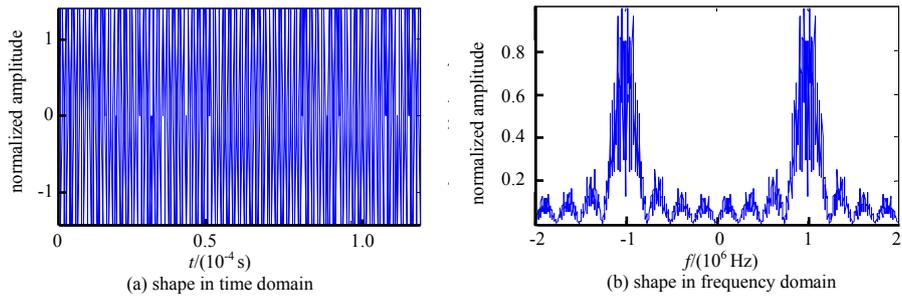


Fig.2 Time domain and frequency domain waveforms of  $m$  sequence BPSK signal  
图 2  $m$  序列 BPSK 信号的时域和频域波形

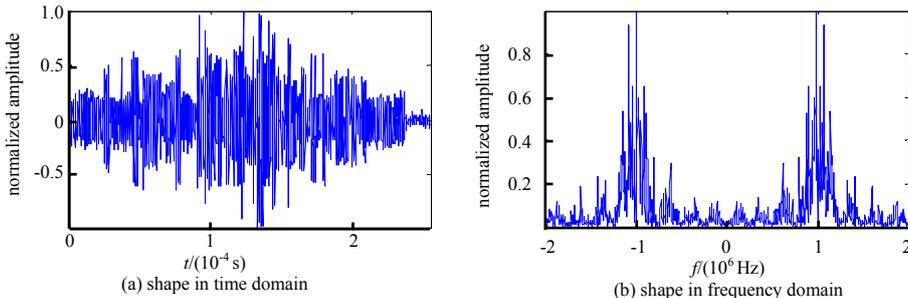


Fig.3 Multi-delay smart noise based on  $m$  sequence BPSK signal

图 3 基于  $m$  序列 BPSK 信号得到的多时延灵巧噪声

基于 DJS 合成的数字多时延干扰信号，其通过相应的匹配滤波器造成的干扰效果见图 4，脉冲压缩后，多时延干扰信号在真实目标前后造成多个假目标信号，覆盖真实目标。理论分析与仿真研究表明，多时延灵巧干扰信号能够在目标信号的整个脉冲积累期间造成密集的随机假目标干扰，从而具有很好的欺骗干扰效果。图 5 为干扰信号在匹配滤波前后的时频图，从仿真结果可以看出，基于 DJS 合成的数字多时延干扰信号能够自动对准目标信号频带并抵消脉内处理增益，从而大大提高了干扰信号的能量利用效率。仿真实验初步验证了理论推导的正确性和实现算法的有效性。

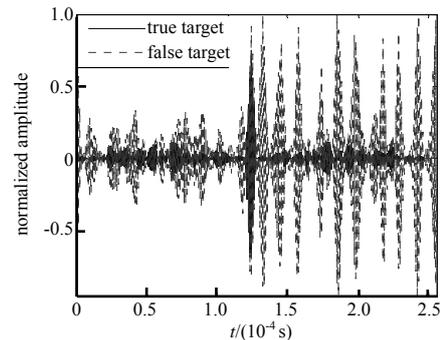


Fig.4 Interference effect of Pseudo-code two-phase modulation fuze  
图 4 伪码二相调制引信的干扰效果

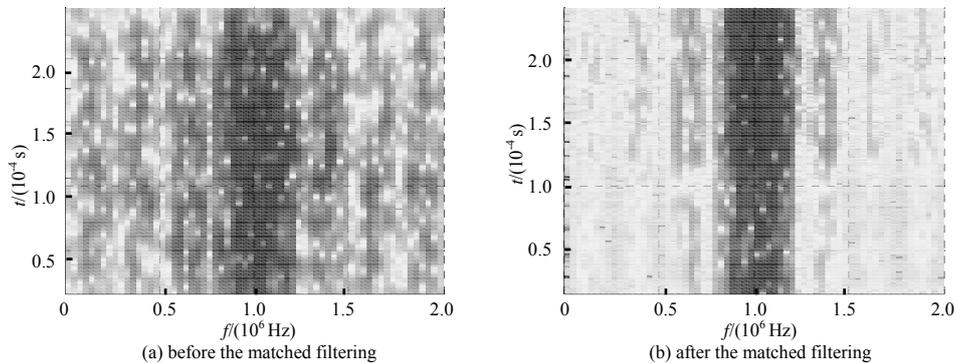


Fig.5 Multi-delay smart noise before and after the matched filtering

图 5 匹配滤波前后的多时延灵巧噪声

### 3 结论

针对具有强抗干扰能力的伪码调相引信，本文提出了基于 DJS 技术的合成数字多时延干扰信号的方法，采用该方法合成的干扰信号能够产生不同时延的多假目标并可覆盖目标回波信号，且假目标数量及幅度起伏可控，兼具有欺骗干扰和压制干扰的效果，理论分析及仿真实验结果表明该方法可以有效对抗伪码调相引信。

#### 参考文献：

- [ 1 ] 涂友超. 典型伪码体制引信参数提取及干扰效果研究[D]. 南京:南京理工大学, 2010. (TU Youchao. Study on parameter extraction and jamming effectiveness of typical pseudo-random code fuze[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Science &Technology, 2010.)
- [ 2 ] 黄光明,赵惠昌. 伪码调相引信的干扰与抗干扰[J]. 探测与控制学报, 2005,27(2):37-40. (HUANG Guangming,ZHAO Huichang. Jamming and anti-jamming of pseudo-random code phase modulation fuze[J]. Journal of Detection & Control, 2005,27(2):37-40.)
- [ 3 ] 赵惠昌. 无线电引信设计原理与方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2012. (ZHAO Huichang. Fundamentals and Methodology of Radio Fuze[M]. Beijing:National Defense of Industry Press, 2012.)
- [ 4 ] 周新刚,赵惠昌,邓建平. 伪码调相与伪随机 PPM 复合引信的抗噪声性能分析[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2008,32(5):623-627. (ZHOU Xingang,ZHAO Huichang,DENG Jianping. Analysis of anti-noise performance for pseudo-random code phase modulation combined with PPM fuze[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology(Natural Science), 2008,32(5):623-627.)
- [ 5 ] 李瑞. DJS 欺骗干扰波形的快速生成技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010. (LI Rui. Research on fast synthesizing the deception jamming based on DJS[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2010.)
- [ 6 ] 汤建龙,曹旭源,斯海飞,等. 基于连续存储的 DRFM 干扰 Simulink 建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2013,25(3):540-543. (TANG Jianlong,CAO Xuyuan,SI Haifei,et al. Simulink modelling and simulation for jamming using DRFM based on continuous memory[J]. Journal of System Simulation, 2013,25(3):540-543.)

(下转第 80 页)