

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.01.010

引用格式: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 Hong-wei, LI Guo-lin, SUI Jian. A New LFM Fuze Distance Deception Jamming Suppression Arithmetic[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(1): 52-57.]

一种新的 LFM 引信距离欺骗干扰抑制算法*

尹洪伟**,李国林,隋 鉴

(海军航空工程学院,山东 烟台 264001)

摘 要:针对线性调频(LFM)引信距离欺骗干扰问题,研究了一种结合随机调斜率和盲分离(BSS)的干扰抑制方法。该方法采用区别对待机制,首先采用随机调斜率,使敌方不易获取引信信号关键参数,从而可以通过简单的匹配滤波方法进行抗干扰。在随机调斜率失效的情况下再采用盲分离算法分离回波和干扰,然后根据频谱的连续性原理获取完整分离信号,最后根据数字射频存储(DRFM)相位量化的特性来区分回波和干扰。实验仿真表明,在干扰信号调斜率达到4%误差以上时随机调斜抗干扰具有很好的效果,且算法中很少(小于10%)会采第二种盲分离算法,因而运算量大为降低,可为引信抗欺骗干扰提供重要的实际参考。

关键词:LFM 引信;距离欺骗干扰;干扰抑制;随机调斜率;盲分离

中图分类号:TN972 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)01-0052-06

A New LFM Fuze Distance Deception Jamming Suppression Arithmetic

YIN Hong-wei, LI Guo-lin, SUI Jian

(Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: To solve the problem of linear FM (LFM) fuze distance deception jamming, a new jamming suppression method is studied which combines random slope and blind source separation (BSS). This method adopts discriminated mechanism, which can make the enemies difficult acquire the fuze's signal parameter. So, the simple method can be used to suppress the jamming. When the random slope is invalid, BSS can be used to separate the echo and jamming, and the spectrum continuity principle is used to acquire the intact signals, and then the digital radio frequency memory (DRFM) phase quantification's characteristic is used to distinguish the echo and jamming. The experiments results indicate that when the jamming signal's slope is greater than four percent, the random slope jamming suppression has great effect, and there is less than ten percent to use the method of BSS. So, the calculated amount can be reduced greatly.

Key words: LFM fuze; distance deception jamming; jamming suppression; random slope; blind source separation

1 引 言

科学技术的发展使现代战争步入了信息化时代,在信息化战争中抗干扰能力的增强一直是提高导弹武器作战效能的重中之重^[1]。引信作为导弹武器的末端引爆装置,控制着导弹最佳起爆时间,是导弹武器发挥作用的关键点^[2-3]。而现代战争中的

复杂电磁环境以及各种人为的有源无源干扰,特别是欺骗性干扰,给引信的正常的工作带来了巨大威胁^[4]。

针对欺骗干扰问题,文献[5-6]提出了正交投影抑制方法,但是正交投影法需要较多的先验知识;为此文献[7]提出了利用盲分离抗干扰的思想,该

* 收稿日期:2013-10-10;修回日期:2013-12-16 Received date:2013-10-10;Revised date:2013-12-16

** 通讯作者:yinhongwei168@126.com Corresponding author:yinhongwei168@126.com

方法可以在对源信号未知的情况下进行干扰抑制,但其采用的信号形式容易被侦测。

针对上述问题,本文提出了一种随机调斜率和盲分离相结合的思想,一方面加大了引信参数的侦测难度,另一方面结合了盲分离的优秀思想,并通过实验证明了其可行性和有效性。

2 LFM 引信及干扰信号分析

对于线性调频引信,其信号发射波形如下式所示^[8]:

$$s(t) = \text{rect}(t/T) e^{j(2\pi f_0 t + \mu t^2)} \quad (1)$$

式中, $\text{rect}(t/T) = \begin{cases} 1, & t \in [0, T] \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$, T 为脉冲宽度, f_0 为载频, μ 为调频斜率。

引信信号遇到目标后返回,其回波信号形式为

$$s_r(t) = a \cdot \text{rect}\left(\frac{t - \tau_T}{T}\right) e^{j\phi_T(t - \tau_T)} e^{j(2\pi f_d t + \varphi_T)} = a \cdot e^{j\phi_T} \text{rect}\left(\frac{t - \tau_T}{T}\right) e^{j(\phi_T(t - \tau_T) + 2\pi f_d t)} \quad (2)$$

式中, a 为幅度系数, τ_T 为回波信号延迟时间, φ_T 为回波初始相位,它服从均匀分布 $U(-\pi, \pi)$, f_d 为回波信号多普勒频率。

$$\text{令 } s'_T = \text{rect}\left(\frac{t - \tau_T}{T}\right) e^{j(\phi_T(t - \tau_T) + 2\pi f_d t)}, \text{ 则} \\ s_r(t) = a \cdot e^{j\varphi_T} s'_T(t) \quad (3)$$

当干扰机采用 DRFM 相位量方式时,其欺骗信号形式为^[9]

$$j'(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \text{sinc}\left(m + \frac{1}{N}\right) e^{j(Nm+1)\phi_j(t)} \quad (4)$$

式中, $N=2^M$, M 为相位量化位数, $\phi_j(t)$ 为干扰信号的相位,转发式欺骗干扰 $\phi_j(t) = \phi_T(t)$ 。在引信接收天线处,欺骗干扰可表示为

$$j(t) = b e^{j\phi_j} j'(t) \quad (5)$$

其中:

$$j'(t) = \text{rect}[(t - \tau_j)/T] e^{j2\pi f_d t} \cdot \sum_{m=-\infty}^{\infty} \text{sinc}(m + 1/N) \cdot e^{j(Nm+1)\phi_T(t - \tau_j)}$$

式中, b 为信号幅度系数, τ_j 为干扰延时, ϕ_j 为干扰初始相位且服从均匀分布 $U(-\pi, \pi)$, f_d 为干扰信号多普勒频移。

3 回波与干扰相关性分析

当接收信号中含有欺骗信号时,对其进行脉压

处理,可以得到两个脉压峰值,此时可采用盲分离进行处理。盲分离对源信号的一个基本要求是,参加分离的源信号之间必须是不相关或者是独立的^[10-11]。通过分析可知,DRFM 进行相位量化的位数越高,干扰越接近回波,且其绝大部分能量集中于基波,因此,干扰信号的基波分量(即 $m=0$)与回波相关性最强能量也是最大。令欺骗干扰的第 m 次谐波为

$$j'_m(t) = \text{rect}[(t - \tau_j)/T] \text{sinc}(m+1/N) \cdot e^{j(Nm+1)\phi_T(t - \tau_j)} e^{j2\pi f_d t}$$

其中, $\phi_T(t) = 2\pi f_0 t + \mu t^2$, f_0 为载频, μ 为调斜率。设 $\tau_j < \tau_T < \tau_j + T$, 则基波与回波相关系数 c_0 为^[7]

$$c_0 = E\{j'_0(t) [s'_T(t)]^* \} = \frac{1}{T + \tau_T - \tau_j} \int_{\tau_j}^{T + \tau_T} j'_0(t) [s'_T(t)]^* dt = \frac{\text{sinc}(1/N) e^{j2\pi f_0(\tau_T - \tau_j)} e^{j\mu(\tau_T^2 - \tau_j^2)}}{T + \tau_T - \tau_j} \cdot \int_{\tau_T}^{T + \tau_j} e^{j[2\pi\mu(\tau_T - \tau_j) + 2\pi(f_d j - f_d T)]t} dt \quad (6)$$

令 $f_0 = \mu(\tau_T - \tau_j) + (f_d j - f_d T)$, 其中 μ 为 10^{14} 量级, T 为 10^{-6} 量级。一般运动目标/干扰机的 $f_d \tau_T / f_d j$ 小于 10^4 量级。引信方存在最佳爆炸距离 τ_d , 当 $\tau_T = \tau_d$ 时起爆。若欺骗信号想达到干扰效果,使引信过早触发,那么它必然要采用循环变化的延时,且延时变化量要远大于回波信号的延时变化量以对准引信的触发距离。于是,我们采用间隔时间 $\Delta t = nT_c$ (n 正整数, T_c 为脉冲周期) 观测信号,则引信的信号延时变化量为 $\Delta\tau_R = -2V_R \Delta t / c$ (V_R 为弹目接近速度), 而欺骗干扰延时变化量 $\Delta\tau_j = -(nk_a + V_R \Delta t / c)$ (k_a 为延时变化速率), 设欺骗干扰每次的延时变化量为 10 ns , 取观测时间间隔为 $\Delta t = 10T_c$, $V_R = 900 \text{ m/s}$, 则 $\Delta\tau_T = -3 \text{ ns}$, $\Delta\tau_j = -101.5 \text{ ns}$ 。所以回波和干扰之间的延时变化量绝对值为 $|\tau_T - \tau_j| = 98.5 \text{ ns}$, 因此积分时间 $T + \tau_T - \tau_j$ 数量级为 10^{-7} , 延时差 $|\tau_T - \tau_j|$ 数量级也为 10^{-7} 。

在上述情况下,积分时间与积分项周期比值约为 $u(T + \tau_j - \tau_T)(\tau_T - \tau_j)$, 将各变量数量级带入的比值 $10^8(\tau_T - \tau_j) - 10^{14}(\tau_T - \tau_j)^2$ 为 10^1 量级,积分时间远大于积分周期,可认为 $c_0 = 0$ 。同理可得,各谐波与回波的相关系数 $c_i = E\{j'_i(t) [s'_T(t)]^* \} = 0$, 因此,干扰与回波的相关系数 $c_{Tj} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} c_i = 0$, 即在 $t \in [\tau_{\text{begin}}, \tau_{\text{end}})$ ($\tau_{\text{begin}}, \tau_{\text{end}}$ 为信号混合部分起止时间) 时

间内,混合信号中的欺骗干扰与目标回波不相关。因此,对于 LFM 引信其欺骗干扰信号和引信回波信号是可以分离的。

4 距离欺骗干扰抑制方法

本文采用随机调斜率和盲分离相结合的方法进行干扰抑制,当引信接收到信号时,首先进行匹配滤波,若调斜率满足误差要求,则在脉压图中只有一个峰值;若不满足误差要求,脉压图中会出现两个峰值,此时再采用盲分离方法抗干扰。采用本方法有两个优点,一是使敌方干扰机不易获取引信信号参数以达到抗干扰目的;二是根据干扰信号与引信参考信号相参与否,采用不同的抑制方法以减少运算量。

4.1 随机调斜率抗干扰分析

对于 DRFM 距离欺骗干扰而言,其干扰的关键在于对 μ 的侦测。在干扰信号对准 μ 的情况下,对接收信号进行脉压会得到两个尖峰值以迷惑引信。但是若使干扰机无法侦测 μ ,即干扰机的 μ_j 同引信发射信号的 μ 之间存在差异,则在信号脉压图中,干扰信号会从尖峰值变为幅度降低时间域展宽的信号形式,从而很容易识别干扰。

变 μ 的利用不仅可以使信号的相关度降低,也可以在分离回波与干扰信号之后作为识别干扰的一个判据。为此,可以在引信中采用一种变 μ 的信号发射形式,即每次发射脉冲的调斜率 μ 是随机的,从而可以对欺骗干扰具有较好的抵抗能力。

假设引信接收机在第 n 个周期接收到的信号为

$$s_{nj}(t_n,\tau)=s_r(t_n,\tau)+j(t_n,\tau) \tag{7}$$

式中, $s_r(t_n,\tau)$ 为第 n 周期的引信回波信号, $j(t_n,\tau)$ 为第 n 周期的干扰信号。将接收信号同引信第 n 周期发射信号做匹配滤波来减少干扰信号的影响,于是得到脉压后的信号

$$\begin{aligned} s(t_n,\tau) &= s_{nj}(t_n,\tau) \otimes s_t^*(t_n,\tau) = \\ & s_r(t_n,\tau) \otimes s_t^*(t_n,-\tau) + \\ & j(t_n,\tau) \otimes s_t^*(t_n,-\tau) \end{aligned} \tag{8}$$

式中, $s_t^*(t_n,\tau)$ 为引信第 n 周期发射信号, $\otimes$ 为卷积符号, $*$ 为共轭符号。从式(8)可以看出,由于干扰信号调斜率的不同,使得它与引信发射信号 $s_t^*(t_n,-\tau)$ 进行匹配滤波时,在距离上不具有聚焦性,可以达到抑制干扰的效果。

4.2 盲分离抗干扰分析

当干扰信号调斜率同发射信号调斜率接近(小于 4%)时,脉压图中产生两个峰值,通过峰值时间的测量,可以确定回波信号和干扰信号混合部分的起止时间 τ_{begin} 和 τ_{end} 。此时,采用稳健的二阶盲辨识算法^[12](SOBI)将该时间段内的混合信号分离开来。假设接收信号为

$$\mathbf{X}=\mathbf{A}\mathbf{S} \tag{9}$$

式中, $\mathbf{X}=[x_1,x_2]^T$ 为引信两路接收信号,信号通道为 $\mathbf{A}=[a_{11},a_{12};a_{21},a_{22}]$, $\mathbf{S}=[s_r(t),j(t)]^T$ 为源信号。算法的分离步骤如下:

(1) 根据稳健正交化方法^[10] 确定其稳健正交化矩阵 $\mathbf{Q}$,稳健正交化后的信号 $\bar{\mathbf{X}}=\mathbf{Q}\mathbf{X}$;

(2) 根据预选的一组时滞($p_1,p_2,\cdots,p_L$) 估计其协方差矩阵集合:

$$\hat{\mathbf{R}}_x(p_i)=(1/N)\sum_{k=1}^N\bar{\mathbf{X}}(k)\bar{\mathbf{X}}(k-p_i)=\mathbf{Q}\hat{\mathbf{R}}_s(p_i)\mathbf{Q}^T$$

(3) 对协方差矩阵集进行联合对角化^[2] $\hat{\mathbf{R}}_x(p_i)=\mathbf{U}\mathbf{D}_i\mathbf{U}^T$,估计正交矩阵 $\mathbf{U}$;

(4) 估计源信号 $\hat{\mathbf{S}}=\mathbf{U}^T\mathbf{Q}\mathbf{X}$,混合矩阵 $\hat{\mathbf{A}}=\mathbf{Q}^+\mathbf{U}$ 。

假设通过盲分离将两部分信号分开得到信号 $\hat{s}_1$ 和 $\hat{s}_2$,并分别测量各分离信号的起止频率,根据信号频谱的连续性完成信号分选,恢复出完整的源信号。由于是 DRFM 相位量化欺骗干扰,其信号的相位会出现分段性,那么恢复出的信号其相位统计次数的方差必会大于回波相位统计次数的方差。

由于相位分布在 $[-\pi,\pi]$ 上,于是将其平均分成 P 份,并统计每个区间上相位个数 $N_i^k(i=1,2;k=1,2,\cdots,P)$,于是分离信号的相位统计方差可分别表示为

$$\sigma_1=\frac{1}{P}\sum_{k=1}^P(N_1^k-N/P)^2 \tag{10}$$

$$\sigma_2=\frac{1}{P}\sum_{k=1}^P(N_2^k-N/P)^2 \tag{11}$$

式中, N 为总的统计次数。

根据统计方差的大小,可以得到如下结果:当 $\sigma_1>\sigma_2$ 时, s_1 为干扰, s_2 为回波;当 $\sigma_1<\sigma_2$ 时, s_1 为回波, s_2 为干扰;当 $\sigma_1=\sigma_2$ 时,不能进行判别。

5 计算机实验仿真

在基于 DRFM 相位量化的距离欺骗干扰下,文献[2]给出了不同量化位数时的鉴别概率,且在 $m\geq 4$ 、信噪比小于 10 dB 时,鉴别概率小于 80。为此,

本文提出了一种采用随机调斜率和盲分离相结合的抗欺骗干扰方法,此方法可以在上述情况下大大提高欺骗干扰的识别率。

5.1 随机调斜率下的信号脉压

对脉冲引信进行距离欺骗干扰,通常情况下是通过对截获的引信发射信号进行延时和转发来实现,由于干扰机的延时处理,基于 DRFM 的欺骗干扰通常只能转发截获的上一周期信号。因此,若采用随机调斜率,则敌方很难确定引信准确的调斜率,从而使干扰信号的脉压失真。

根据文献[8]中 LFM 引信工作原理和相关文献中对 LFM 的介绍,可设引信发射的 LFM 信号周期为 $50\text{ }\mu\text{s}$,脉冲宽度为 $1\text{ }\mu\text{s}$,带宽为 100 MHz ,采样频率为 650 MHz ,目标回波和干扰的延迟分别为 $0.8\text{ }\mu\text{s}$ 和 $0.6\text{ }\mu\text{s}$,回波多普勒频率为 13 kHz ,欺骗信号多普勒 15 kHz ,量化位数 $m=3$,混合矩阵 $\mathbf{A}=\begin{bmatrix}0.679\ 1,0.367\ 4\\0.395\ 5,0.988\ 0\end{bmatrix}^\circ$ 。

在采用固定调斜率时,接收信号的脉压如图 1 所示,敌方干扰机在捕获引信信号调斜率后,向引信发射欺骗信号,此时引信接收机接收到的信号为回波和干扰的混合信号,对该信号进行脉压可以发现,一旦调制参数被截获,则脉压图中会出现两个峰值,此时无法直接鉴别哪个是干扰,必须通过其他方式进一步区分。

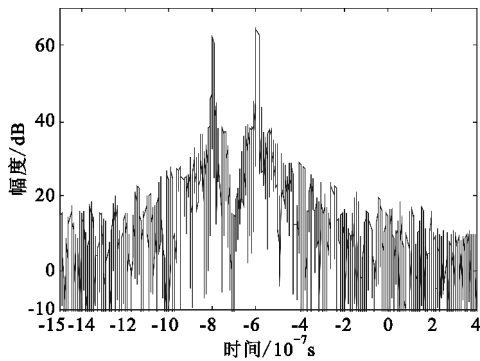


图 1 参数截取后的接收信号脉压图
Fig. 1 Pulse comprssion when the slope is captured

在采用随机调斜率的情况下,其脉压波形如图 2 所示,在干扰没有对准的情况下,调斜率的抖动使得干扰信号失去了与引信参考信号之间的相关性,从而导致了脉压图的峰值降低,时间域展宽,峰值的位置也会发生偏移。仿真分析发现,当调斜率误差达到 4% 以上时,通过直接脉压就可以达到很好的抑制效果。

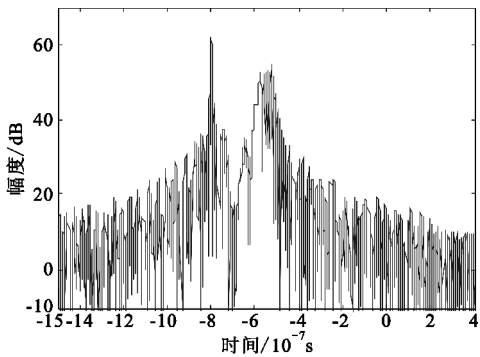


图 2 调斜率未对准时的脉压图脉压
Fig. 2 Pulse compression when the slope is matched

如图 3 所示,随机产生 100 次 1 000 个周期的调斜率,若敌方侦测到随机斜率产生模型,此时调斜率误差在 4% 以内的平均占 9.4%;若敌方没有侦测到完全准确的模型,则调斜率误差在 4% 以内根据不同的模型仅占 2%~7% 不等,说明了采用随机调斜率后,干扰抑制能力增强。

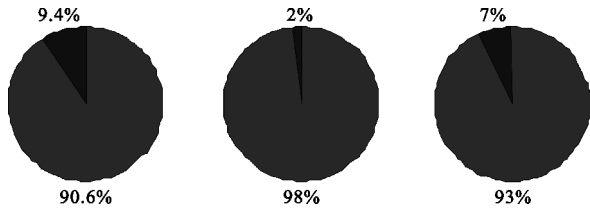


图 3 不同对准模型下的对准概率
Fig. 3 Correct probability in different models

5.2 调斜率对准时的干扰抑制

采用随机调斜率并不能完全保证干扰信号调斜率误差很大(至少 4%),一旦调斜率对准,则变为了图 1 中脉压图的模式,此时可以采用盲分离方法分离回波和干扰,从而进一步抑制干扰。采用 4.2 节中的盲分离算法,以图 1 中的脉压为例,可得 $\tau_{\text{begin}}=0.8\text{ }\mu\text{s}$, $\tau_{\text{end}}=1.6\text{ }\mu\text{s}$,则起止时间之内的接收信号形式如图 4 所示,可以看出信号杂乱无章。

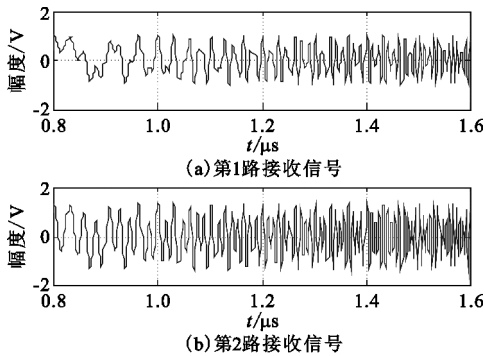


图 4 引信接收信号
Fig. 4 Received signals of the fuze

将两路进行进行盲分离,分离信号如图 5 所示,从图中可以看出,通过盲源分离算法,混合信号得到了很好的分离。

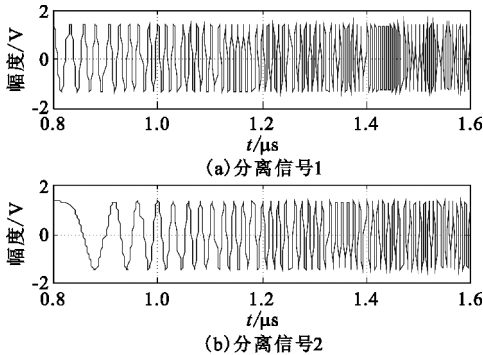


图 5 分离信号
Fig. 5 Separated signals

为了获取完整的分离信号,需要将分离来的信号同分离时间之外的信号进行连接,而信号频谱的连续性为我们提供了渠道。把回波和干扰信号分别分成两部分,一部分是 $t \in [\tau_{\text{begin}}, \tau_{\text{end}})$ 之间的信号,另一部分是在该时间段外的信号,我们把分段后的信号进行频谱分析,可以发现信号频谱具有连续性,如图 6 和图 7 所示。

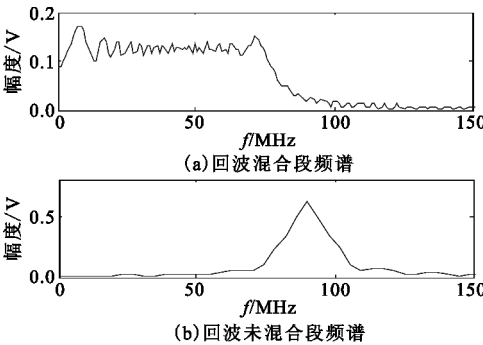


图 6 回波信号频谱连续性
Fig. 6 Spectrum continuity of echo signal

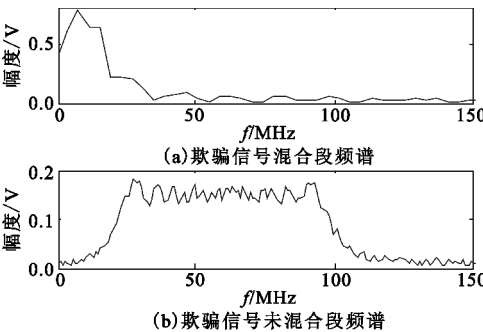


图 7 欺骗信号频谱连续性
Fig. 7 Spectrum continuity of deception signal

于是,将图 5 中通过盲分离方法分开的两路信号

$\hat{s}_1$ 和 $\hat{s}_2$ 进行频谱分析,得到图 8 所示的信号频谱图,于是根据频谱连续性必然会得到完整的分离信号。

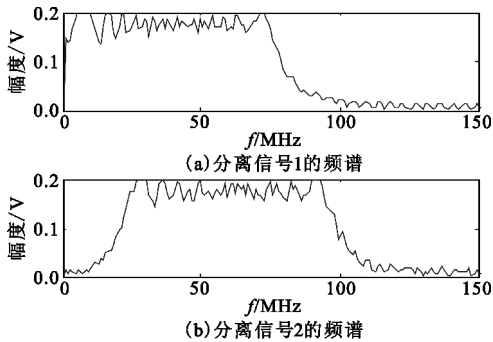


图 8 分离信号频谱
Fig. 8 Spectrum of separated signals

得到完整信号后,需要对信号进行鉴别,由于 DRFM 相位量化欺骗干扰信号的相位具有区间分布特性,故方差较大;而回波信号相位具有连续性,故方差小。并且其区间分布随着多普勒频率的降低和量化位数的降低而愈发显著,如图 9 和图 10 所示,其中方差较大者为干扰信号。图 9 为量化位数等于 3、多普勒频率较低时的相位统计分布,图 10 为本文参数下的分布,可见由于量化的作用,欺骗信号相位统计产生了积聚,于是可以通过相位统计方差将其区分。

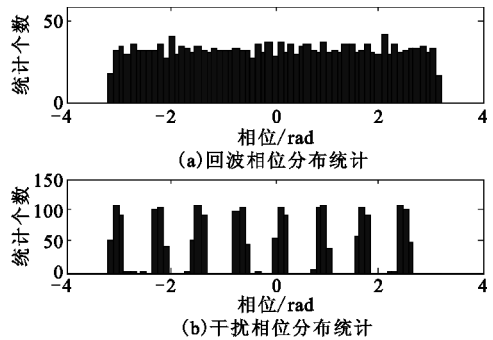


图 9 $m=3$ 且多普勒频率较小时相位统计
Fig. 9 Phase statistics when m is equal to 3 and doppler frequency is small

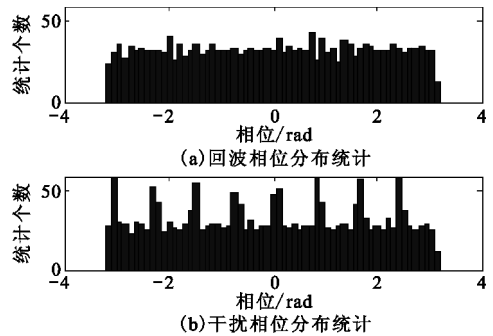


图 10 本文参数下相位分布统计
Fig. 10 Phase statistics with parameters in this paper

6 结束语

本文针对 LFM 引信距离欺骗干扰,提出了采用随机调频和盲分离相结合的干扰抑制思想,通过理论分析和实验仿真,证明了在干扰调斜率达到 4% 以上即可通过匹配滤波抑制干扰,在调斜率误差较小时,通过盲分离抗干扰也可达到很好的效果,并且由于在绝大多数情况下调斜率误差较大,只需采用匹配滤波方法,从而减少了盲分离抗干扰的运算次数,大大降低了运算量。但是随着量化位数的提高,欺骗信号相位的连续性越来越好,因此相位统计方差法将会受到限制,而文中提到的延时变化量将会为我们提供新的鉴别方式,为下一步研究指明了方向。

参考文献:

- [1] 施坤林, 黄征, 马宝华, 等. 国外引信技术发展趋势分析与加速发展我国引信技术的必要性[J]. 探测与控制学报, 2005, 27(3): 1-5.
SHI Kun-lin, HUANG Zheng, MA Bao-hua, et al. The Analysis of the Characteristics and Trend of the Foreign Fuze Technology and the Necessary of the Rapid Developing of Our Fuze Technology[J]. Journal of Detection & Control, 2005, 27(3): 1-5. (in Chinese)
- [2] 崔占忠, 宋世和, 徐立新. 近炸引信原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
CUI Zhan-zhong, SONG Shi-he, XU Li-xin. The Principle of Proximity Fuze[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. (in Chinese)
- [3] 李潮, 张多林, 刘付显. 导弹无线电引信及其干扰技术研究[J]. 航空计算机, 2007, 37(5): 69-72.
LI Chao, ZHANG Duo-lin, LIU Fu-xian. Research on Missile Radio Fuses and Jamming Fuse Technologies[J]. Aeronautical Computing Technique, 2007, 37(5): 69-72. (in Chinese)
- [4] 张淑宁. 伪码调相信引信抗典型干扰的信号处理方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006: 2-7.
ZHANG Shu-ning. Study on Signal Processing Method of Suppressing Typical Interference Imposed on Pseudo-random Code Phase-modulation Fuze[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006: 2-7. (in Chinese)
- [5] 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.
ZHANG Shu-ning, ZHAO Hui-chang. Method of Suppressing Fraudulent Jamming with Cross-correlation and Orthogonal Projection for PN Fuze[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2007, 31(4): 509-513. (in Chinese)
- [6] 张淑宁, 赵惠昌. 基于延时变化量估计的伪码引信抗欺骗式干扰方法[J]. 宇航学报, 2008, 29(1): 326-331.
ZHANG Shu-ning, ZHAO Hui-chang. The Method of Fraudulent Interference Excision Based on Time Delay

- Difference Estimation for PN Fuze[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(1): 326-331. (in Chinese)
- [7] 罗双才, 唐斌. 一种基于盲分离的欺骗干扰抑制算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12): 2801-2806.
LUO Shuang-cai, TANG Bin. An Algorithm of Deception Jamming Suppression Based on Blind Signal Separation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(12): 2801-2806. (in Chinese)
- [8] 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 Hui-chang. Fundamentals and Methodology of Radio Fuze[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [9] 陈亚培. 雷达距离欺骗干扰的对抗方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 43-45.
CHEN Ya-pe. Study on the Method of Radar Distance Deception Jamming Against[D]. Xi'an: Xidian University, 2012: 43-45. (in Chinese)
- [10] Abolghasemi V, Ferdowsi S, Sanei S. Blind Separation of Image Sources via Adaptive Dictionary Learning[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(6): 2921-2930.
- [11] Chien Jen-Tzung, Hsieh Hsin-Lung. Convex Divergence ICA for Blind Source Separation[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2012, 20(1): 290-301.
- [12] Andrzej C, Amari Shun-ichi. 自适应盲信号与图像处理[M]. 吴国正, 唐劲松, 章林柯, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005.
Andrzej C, Amari Shun-ichi. Adaptive Blind Singal and Image Processing[M]. Translated by WU Guo-zheng, TANG Jin-song, ZHANG Lin-ke, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)

作者简介:



尹洪伟(1987—),男,江苏徐州人,2009年获硕士学位,现为海军航空工程学院博士研究生,主要研究方向为目标中近程探测;

YIN Hong-wei was born in Xuzhou, Jiangsu Province, in 1987. He received the M. S. degree in 2009. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns short-range target detection.

Email: yinhongwei168@126.com

李国林(1955—),男,吉林省吉林市人,博士,教授、博士生导师,主要研究方向为军用目标中近程探测;

LI Guo-lin was born in Jilin, Jilin Province, in 1955. He is now a professor with the Ph. D. degree and also the Ph. D. supervisor. His research concerns short-range target detection.

隋 鉴(1983—),男,山东龙口人,博士研究生,主要研究方向为目标中近程探测。

SUI Jian was born in Longkou, Shandong Province, in 1983. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns short-range target detection.