

基于ACM的LFM信号抗瞄准式干扰方法

刘振钰, 刘晓斌*, 赵 锋, 徐志明, 谢艾伦, 肖顺平

(国防科技大学电子科学学院电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要: 瞄准式干扰由于干扰能量集中、干扰强度大, 严重影响雷达目标探测性能。针对瞄准式干扰, 提出了基于幅度编码调制(amplitude code modulation, ACM)的信号抗干扰方法。首先, 通过设计 ACM 信号, 实现雷达信号的频谱搬移, 并根据 ACM 信号参数对匹配滤波器进行频移处理, 获得谐波脉压的参考信号。其次, 对谐波进行脉冲压缩处理, 得到目标回波在谐波处的一维距离像。然后, 通过能量补偿, 弥补 ACM 带来的能量损失, 即可得到与原始信号回波一致的目标一维距离像。最后, 给出了 ACM 及回波抗干扰处理流程, 并通过数字仿真进行验证。仿真结果表明, 所提方法所获得的目标回波一维距离像与未被干扰信号获得的目标回波一维距离像基本一致。当调制频率为 5 倍信号带宽时, ACM 信号较原始信号抗瞄准式干扰性能提升了 32 dB。

关键词: 幅度编码; 瞄准式干扰; 匹配滤波; 检测概率

中图分类号: TN 959.1

文献标志码: A

DOI: 10.12305/j.issn.1001-506X.2024.08.02

Anti aiming jamming method of LFM signal based on ACM

LIU Zhenyu, LIU Xiaobin*, ZHAO Feng, XU Zhiming, XIE Ailun, XIAO Shunping

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming jamming seriously affects radar detection performance for targets due to its concentrated jamming energy and high jamming intensity. Point at aiming jamming, a signal anti jamming method is proposed based on amplitude code modulation (ACM) signal. Firstly, ACM signal is designed to shift the spectrum of radar signal and shift the frequency of match filter according to the ACM signal parameters, with the aim to obtain the reference signal of pulse compression of harmonic. Secondly, pulse compression is applied to the harmonic to obtain the one-dimensional range profile of the target echo at the harmonic. Then, energy compensation is performed to compensate the energy loss caused by ACM, and obtain the one-dimensional range profile of the target consistent with the original signal echo. Finally, the process of ACM and the operation of echo anti jamming is given and verified by digital simulation. Simulation results shows that the one-dimensional range profile of target echo obtained by the proposed method is basically consistent with that obtained by undisturbed signal. When the modulation frequency is 5 times of the signal bandwidth, the anti aiming jamming performance of ACM signal is improved by 32 dB compared with the original signal.

Keywords: amplitude code; aiming jamming; match filter; detection probability

0 引言

在现代战争中, 雷达已成为不可缺少的电子设备, 而容易受到干扰又是雷达的一个致命弱点^[1]。由于雷达接收机

只接收其工作频段内的信号, 因此针对雷达工作频率的压制干扰是目前使用最多的干扰方式^[2-5]。其中, 瞄准式干扰^[6-8]采用频带宽度仅略大于雷达接收机工作带宽的干扰信号, 因此其干扰功率集中, 干扰频带较窄, 干扰功率利用

收稿日期: 2022-11-18; 修回日期: 2023-03-04; 网络优先出版日期: 2023-04-03。

网络优先出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20230403.1414.013.html>

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(62001481); 湖南省自然科学基金青年项目(2021JJ40686)资助课题

* 通讯作者。

引用格式: 刘振钰, 刘晓斌, 赵锋, 等. 基于 ACM 的 LFM 信号抗瞄准式干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(8): 2546-2553.

Reference format: LIU Z Y, LIU X B, ZHAO F, et al. Anti aiming jamming method of LFM signal based on ACM[J]. Systems Engineering and Electronics, 2024, 46(8): 2546-2553.

率高,干扰效果好。采取何种手段加以对抗,一直以来都是雷达抗干扰领域研究的热点问题。

目前针对抗瞄准式干扰的研究主要集中在雷达信号频率设计方面,研究较为广泛的有频率捷变^[9-12]和脉内多载频^[13-16]等。频率捷变信号可以实现大带宽跳频,不仅使得侦察机难以准确识别雷达辐射源参数,同时载频跳变可以有效降低干扰功率密度^[17-18],但不易与动目标显示和脉冲多普勒体制兼容^[19]。脉内多载频信号因在一个脉冲内有多个频点,在面对瞄准式干扰时,可通过对其他未被干扰的频点进行处理得到目标信息,因此具有较强的抗干扰能力^[20]。

文献[21]首次提出了间歇采样转发干扰概念并对其数学原理进行了详细推导,通过低速间歇采样,在当前脉冲产生干扰信号,解决了基于数字射频存储器干扰的时延问题。文献[22-24]根据间歇采样原理,对雷达信号进行间歇收发处理,解决了微波暗室目标测量的收发信号互耦问题。文献[25-28]结合压缩感知理论,对间歇收发信号回波距离像进行了重构,实现了在杂波环境中对目标信息的精确提取。文献[29-30]提出了一种幅度编码的组合脉冲间歇收发处理方法,消除了因间歇收发产生的距离像虚假峰。

文献[31]通过对雷达信号进行间歇采样调制,详细分析了调制后雷达信号的时频域特性。在间歇调制后,会对信号进行频谱搬移,信号呈现多频点特性。结合脉内多载频信号的抗干扰优势,间歇调制可以提高信号抗干扰性能。同时,脉内调制对信号的时域切断,也将扰乱侦察方的信号参数提取。

本文根据间歇采样思想和间歇收发调控原理,提出幅度编码调制线性调频(amplitude code modulation-linear frequency modulation, ACM-LFM)信号抗瞄准式干扰方法。通过设计幅度编码信号,分析了 LFM 信号调制幅度编码(amplitude code modulation, ACM)特性及 ACM 抗干扰的基本原理。本文详细论述了 ACM 抗干扰的处理流程,根据该流程进行了仿真实验,分析了 ACM 信号的探测性能并验证了所提方法的有效性。

1 ACM 抗干扰基本原理

幅度编码信号波形是一个矩形脉冲串,如图 1 所示,其调制周期为 T_s ,脉宽为 τ , τ 在 $[0, T_s/2]$ 区间任意取值,表达式为

$$p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \otimes \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_s) \quad (1)$$

式中: $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数; \otimes 表示卷积运算; $\delta(\cdot)$ 为单位冲击函数; n 为脉冲数,且有

$$\text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) = \begin{cases} 1, & \left|\frac{t}{\tau}\right| \leq \frac{1}{2} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

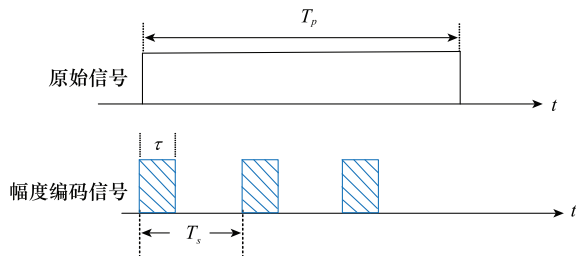


图 1 幅度编码信号示意图

Fig. 1 Schematic diagram of amplitude coded signal

将式(1)进行傅里叶变换,得到幅度编码信号的频谱为

$$P(f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \tau f_s \text{sinc}(nf_s \tau) \delta(f - nf_s) \quad (3)$$

式中: $f_s = 1/T_s$ 为调制频率; $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/\pi x$ 为 sinc 函数。

由式(3)可以看出,幅度编码信号的频谱由一系列等间隔搬移的冲激函数叠加构成,其搬移距离由调制频率 f_s 决定,各阶幅度服从 sinc 函数分布。根据此特性,ACM 即是对雷达信号在频域上的频谱搬移。

雷达发射信号 $s(t)$ 经 ACM 后可以表示为

$$x(t) = p(t)s(t) \quad (4)$$

对式(4)进行傅里叶变换,得到 $x(t)$ 的频谱为

$$X(f) = P(f) \otimes S(f) \quad (5)$$

式中: $P(f)$, $S(f)$ 分别为 $p(t)$ 和 $s(t)$ 的频谱。

将式(3)代入式(5),得到

$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \tau f_s \text{sinc}(nf_s \tau) S(f - nf_s) \quad (6)$$

设 $s(t)$ 的带宽为 B 。从式(6)可以看出,ACM 后各阶频谱分量搬移间隔为 f_s 。因此,当 $f_s < B$ 时,信号频谱搬移后各阶频谱分量将会发生混叠,反之当 $f_s \geq B$ 时,各阶频谱分量不会发生混叠,因此不会相互影响。利用此特性,当回波频谱主周期被干扰时,对匹配滤波器进行频移处理,使其频谱处于未被干扰的谐波分量处,通过对谐波进行脉冲压缩处理,即可获得目标一维距离像。

2 ACM 抗干扰方法

2.1 LFM 信号的 ACM 特性

设雷达发射信号为 LFM 信号,其表达式为

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp[j2\pi f_0 t + j\pi \mu t^2] \quad (7)$$

式中: T_p 为脉宽; f_0 为载频; $\mu = B/T_p$ 为调制斜率。

其频谱表达式为

$$S(f) = \text{rect}((f - f_0)/B) \cdot \exp[j\pi(f - f_0)^2/\mu - j\pi/4] \quad (8)$$

对 LFM 信号进行 ACM,得到调制后信号为

$$x(t) = p(t)s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \exp[j2\pi f_0 t + j\pi \mu t^2] \quad (9)$$

将式(8)、式(9)代入式(6),得到 ACM 后 LFM 信号频谱为

$$X(f) = \tau f_s \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{rect}((f - nf_s - f_0)/B) \text{sinc}(nf_s \tau) \cdot \exp[j\pi(f - nf_s - f_0)^2/\mu - j\pi/4] \quad (10)$$

根据式(6)和式(10),当 $f_s \geq B$ 时, $\tilde{X}(f)$ 为 $S(f)$ 以 f_s 为间隔均匀搬移。

LFM 信号经 ACM 后频谱变化如图 2 所示。

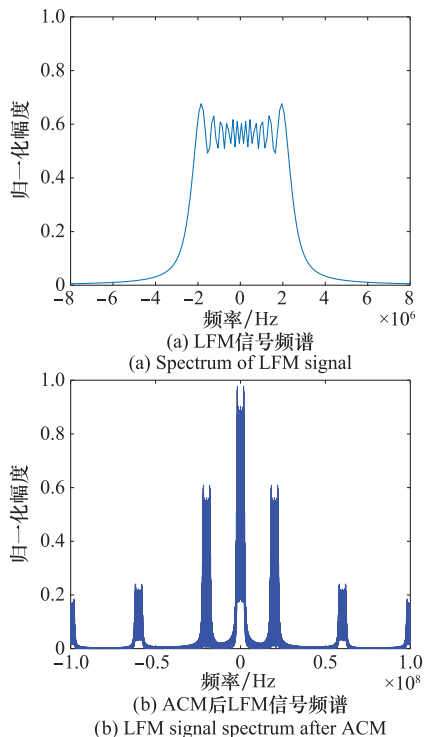


图 2 ACM-LFM 信号频谱图

Fig. 2 Spectrum diagram of ACM-LFM signal

2.2 匹配滤波器设计

当回波频谱主周期被干扰时,对匹配滤波器以 f_s 为间隔作频移处理,即将脉压参考信号载频 f_0 频移至谐波处,得到谐波脉压参考信号为

$$s_r(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp[j2\pi(f_0 + nf_s)t + j\pi\mu t^2] \quad (11)$$

其中,一次谐波处的参考信号为

$$s_{r1}(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp[j2\pi(f_0 + f_s)t + j\pi\mu t^2] \quad (12)$$

参考信号频谱频移如图 3 所示。

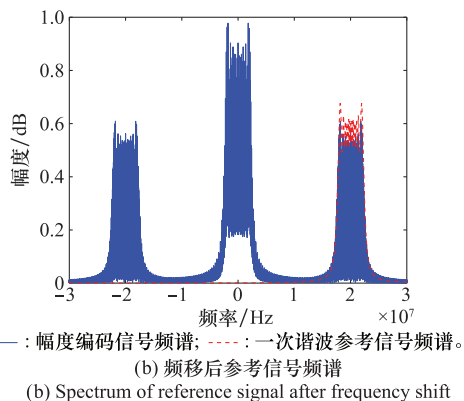
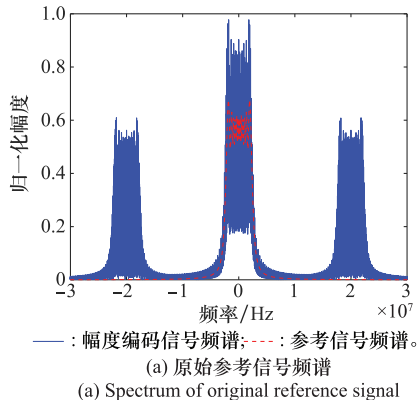


图 3 参考信号频谱图

Fig. 3 Spectrum diagram of reference signal

2.3 抗瞄准式干扰回波处理

设匹配滤波器的传递函数为 $h(t)$, 频谱为 $H(f)$, 有

$$h(t) = s^*(-t) \quad (13)$$

式中: $s^*(\cdot)$ 表示 $s(\cdot)$ 的共轭。

对于频移后的匹配滤波器,其频谱为

$$H_s(f) = H[f - f(n)] \quad (14)$$

式中: $f(n)$ 为匹配滤波器频移量。

根据傅里叶变换性质,其传递函数为

$$h_s(t) = h(t) \cdot \exp[j2\pi f(n)t] \quad (15)$$

雷达信号通过频移、匹配滤波处理后的输出为

$$y(t) = s(t) \otimes h_s(t) \quad (16)$$

对式(16)进行傅里叶变换,得到频移后匹配滤波输出的频谱为

$$Y(f) = S(f)H_s(f) = S(f)S^*[f - f(n)] \quad (17)$$

将式(16)代入式(17),得到 $x(t)$ 的频移后匹配滤波输出频谱为

$$Y_x(f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \tau f_s \text{sinc}(nf_s \tau) S(f - nf_s) S^*[f - f(n)] \quad (18)$$

对式(18)进行傅里叶逆变换,得到 $x(t)$ 的频移后匹配滤波输出为

$$y_x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \tau f_s \text{sinc}(nf_s \tau) \cdot \{[s(t) \cdot \exp(j2\pi nf_s t)] \otimes [s^*(-t) \cdot \exp(j2\pi f(n)t)]\} \quad (19)$$

设干扰信号为 $j(t)$, 当雷达信号被干扰时,有

$$s_j(t) = s(t) + j(t) \quad (20)$$

被干扰信号通过频移、匹配滤波处理后的输出为

$$y_j(t) = s_j(t) \otimes h_s(t) = [s(t) + j(t)] \otimes h_s(t) = y_x(t) + j(t) \otimes h_s(t) = y_x(t) + j(t) \otimes [s^*(-t) \cdot \exp(j2\pi f(n)t)] \quad (21)$$

由式(19)、式(21)可知,ACM 信号经频移后的匹配滤波输出为具有不同频移量 nf_s 的原信号匹配滤波输出的线性叠加,其幅度加权系数为 $a_n = \tau f_s \text{sinc}(nf_s \tau)$ 。

令 $D = \tau/T_s$ 为 $p(t)$ 的占空比,则有

$$a_n = D \text{sinc}(nD) = \frac{\sin(nD\pi)}{n\pi} \quad (22)$$

即 ACM 信号匹配滤波输出衰减幅度服从与 D 相关的 sinc 函数,得到补偿系数为

$$C=\frac{n\pi}{\sin(nD\pi)}$$

(23)

通过系数补偿,即可获得与原始回波信号一致的一维距离像。

2.4 ACM 抗干扰处理流程

综合上文,ACM 抗干扰处理流程如图 4 所示。

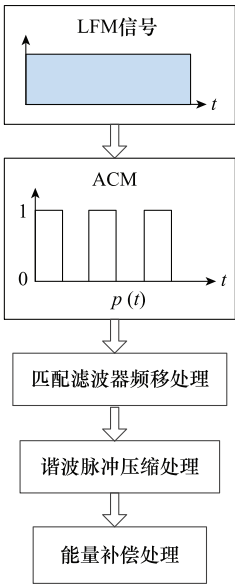


图 4 ACM 抗干扰流程图
Fig. 4 Anti jamming flowchart of ACM

具体步骤如下。

步骤 1 LFM 信号 ACM。考虑瞄准式干扰信号频谱可能会超出雷达工作信号频谱的 0.5~1 倍, f_s 一般设置为大于 2 倍雷达信号带宽,利用调制后信号频谱搬移特性,得到避开干扰信号频谱的谐波频谱。

步骤 2 匹配滤波器频移处理。以 f_s 为间隔,对匹配滤波器进行频移处理,使其频谱处于未被干扰的谐波分量处,获得谐波脉冲压缩的参考信号,如图 5 所示。

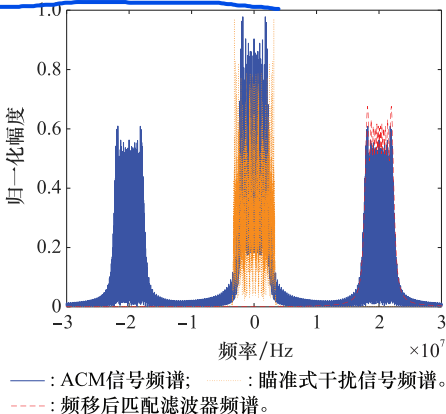


图 5 频移后匹配滤波器频谱图

Fig. 5 Spectrum diagram of match filter after frequency shift

步骤 3 谐波脉冲压缩处理,得到谐波处目标回波一维距离像。

步骤 4 能量补偿。弥补 ACM 带来的能量损失,获得与原始信号一致的目标一维距离像。

3 仿真分析

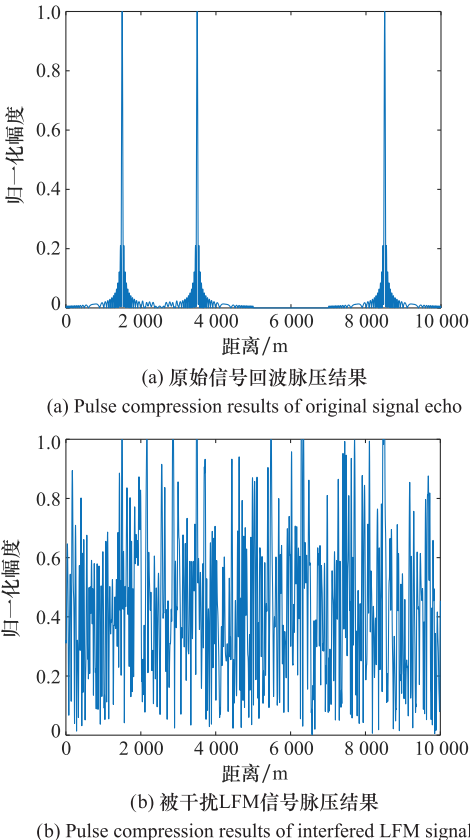
为了对所提出的 ACM 信号抗干扰方法进行验证并分析该信号的探测性能,进行仿真实验。实验参数如表 1 所示。

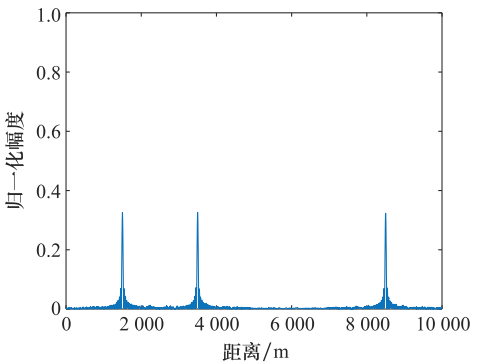
表 1 仿真实验参数表

Table 1 Table of simulation experiment parameters	
参数	数值
LFM 信号脉宽/ μs	10
LFM 信号带宽/MHz	5
ACM 频率/MHz	20
幅度编码信号占空比/%	0.5
点目标数量	3
点目标位置/m	1 500、3 500、8 500
干扰信号类型	高斯白噪声
干扰信号带宽/MHz	8

3.1 ACM 信号抗干扰性能分析

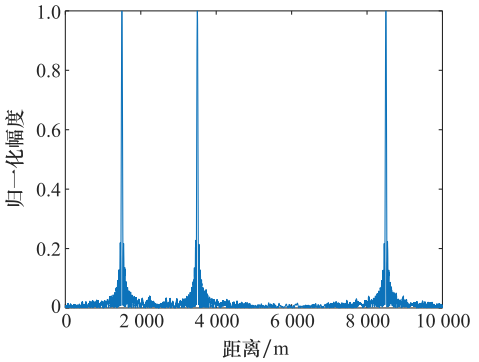
首先对 ACM 前后目标回波一维距离像进行分析对比,仿真结果如图 6 所示。





(c) ACM信号谐波脉压结果

(c) Pulse compression results of harmonic of ACM signal



(d) 谐波脉压能量补偿

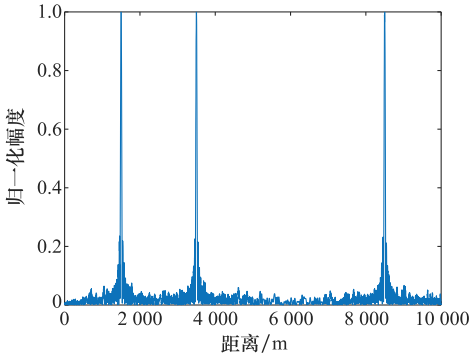
(d) Energy compensation of harmonic pulse compression

图 6 ACM-LFM 信号抗瞄准式干扰仿真结果

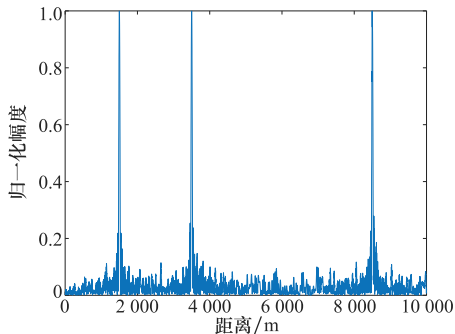
Fig. 6 Anti aiming jamming results of ACM-LFM signal

图 6(a)为原始 LFM 信号回波一维距离像。图 6(b)为被干扰 LFM 信号回波一维距离像,显然雷达回波被干扰信号污染,无法探测目标。图 6(c)为 ACM 信号回波一维距离像,可以看到雷达精确探测出 3 个点目标位置,对比图 6(a),仅在幅度上有所损失。经补偿后的距离像如图 6(d)所示,可以看到补偿后的一维距离像与原始 LFM 信号回波一维距离像基本一致。

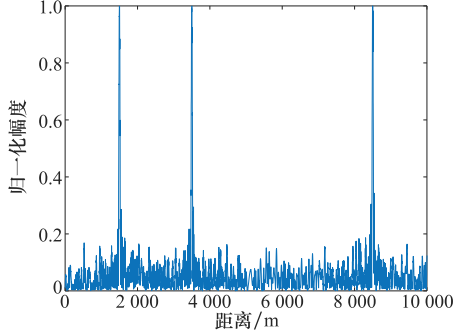
然后分析 ACM 信号抗瞄准式干扰性能。图 7 给出了信干比(signal to jamming ratio, SJR)分别为 -20 dB 、 -25 dB 、 -30 dB 、 -35 dB 时,ACM 信号回波脉压结果。



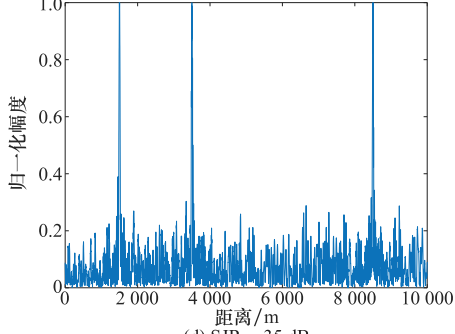
(a) SJR=-20 dB



(b) SJR=-25 dB



(c) SJR=-30 dB



(d) SJR=-35 dB

图 7 不同 SJR 下 ACM 信号回波脉压结果

Fig. 7 Pulse compression results of ACM echo with different SJR

可以看出,ACM 信号具有较强的抗干扰性能,在 SJR 为 -35 dB 时,脉压结果能清晰地显示 3 个目标回波峰值,干扰信号能较好地被抑制。

图 8 给出了不同 f_s 下雷达检测概率随 SJR 变化的曲线。

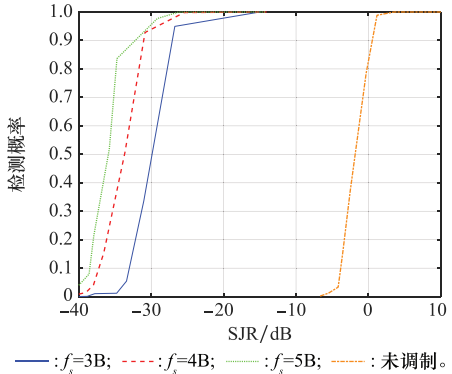


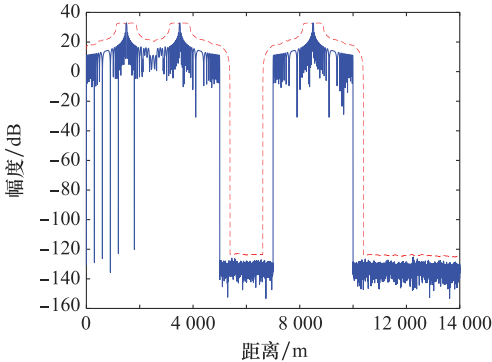
图 8 不同调制频率下雷达检测概率随 SJR 变化的曲线

Fig. 8 Curve of radar detection probability with different modulation frequency versus SJR

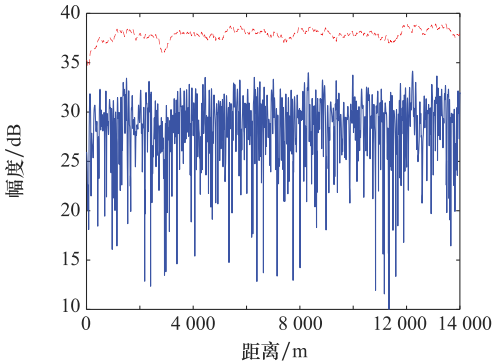
可以看出,当 $f_s=5\text{B}$ 时,SJR 减小至 -30 dB ,雷达检测概率仍然能够达到 95% ,相较于原始 LFM 信号,抗瞄准式干扰性能提升了 32 dB 。同时可以看出, f_s 越大,雷达检测性能越好,这是由于随着 f_s 的增大,信号频谱搬移距离也随之增大,谐波频谱距离干扰信号频谱更远,隔离度更高。

3.2 ACM 信号探测性能分析

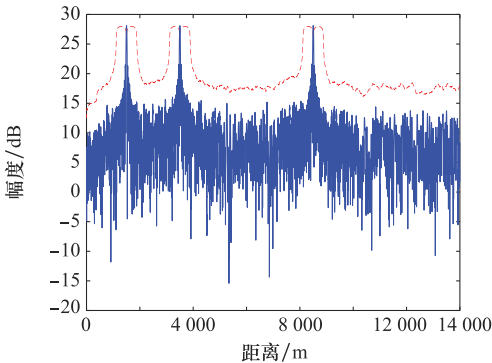
首先分析仅考虑瞄准式干扰时 ACM 信号的探测性能,采用恒虚警率(constant false alarm rate, CFAR)检测方法,将 SJR 设置为 -33.5 dB ,虚警率(probability of false alarm, PFA)设置为 10^{-6} ,CFAR 检测仿真结果如图 9 所示。



(a) 原始信号CFAR检测结果
(a) CFAR detection results of original signal



(b) 被干扰信号CFAR检测结果
(b) CFAR detection results of interfered signal



(c) ACM信号CFAR检测结果
(c) CFAR detection results of ACM signal
--- : CFAR门限; — : 信号。

图 9 信号 CFAR 检测结果

Fig. 9 CFAR detection result of ACM signal

图 9(a)为原始 LFM 信号 CFAR 结果,雷达检测出 3 个目标。图 9(b)为被干扰 LFM 信号 CFAR 结果,目标被噪声淹没,雷达无法检测出目标。图 9(c)为 ACM 信号 CFAR 结果。可以看出,干扰信号被抑制,雷达检测出 3 个目标,CFAR 结果与脉压结果一致。

分析包含瞄准式干扰及宽带噪声干扰情况下,ACM 信号的探测性能。瞄准式干扰信号 SJR 固定为 -33.5 dB ,设 PFA 分别为 10^{-6} 、 10^{-5} 、 10^{-4} ,在不同宽带干扰 SJR 下检测概率曲线如图 10 所示。

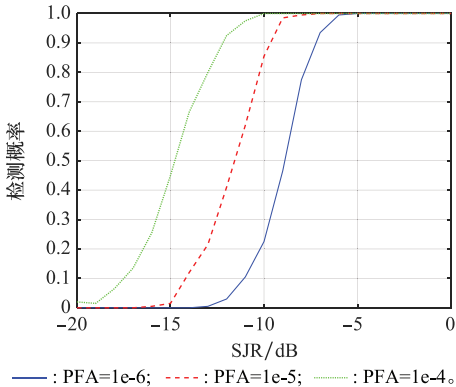


图 10 不同 PFA 下雷达检测概率随 SJR 变化的曲线

Fig. 10 Curve of radar detection probability versus SJR with different PFA

可以看出,当 PFA 为 10^{-4} 时,即当宽带干扰 SJR 减小至 -11.5 dB 时,雷达检测概率仍然能够达到 95% 。

4 结 论

对信号进行 ACM,会使得信号频谱产生离散化搬移。针对瞄准式干扰抑制问题,利用上述特性,结合 ACM 参数设计,提出基于 ACM 的信号抗瞄准式干扰方法。所提方法通过对匹配滤波器进行频移处理,避开瞄准式干扰信号频谱,获得未被干扰的谐波分量处的脉压参考信号,对谐波进行脉压后获得目标回波一维距离像。结合 ACM 抗干扰处理流程,进行了仿真实验分析。结果表明,面对瞄准式干扰,所提方法可获得与原始信号一致的目标回波一维距离像,在调制频率为 5 倍信号带宽时,调制信号较原始信号抗瞄准式干扰性能提升 32 dB ,在信号处理领域进行能量补偿,避免了为提高雷达功率带来的成本的增加。本文所提方法在雷达对抗瞄准式干扰领域具有一定的理论指导意义和实际应用价值。

参考文献

[1] 冯德军,刘进,赵锋,等. 电子对抗与评估[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2018.
FENG D J, LIU J, ZHAO F, et al. Electronic countermeasures and evaluation[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2018.
[2] LI Z, TAI N, WANG C, et al. A study on blanket noise jamming to LFM pulse compression radar[C]// Proc. of the IEEE

- International Conference on Signal Processing, Communications and Computing, 2017.
- [3] WU Q H, ZHAO F, AI X F, et al. Two-dimensional blanket jamming against ISAR using nonperiodic ISRJ[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 11(19): 4031–4038.
 - [4] GAO S, YANG X P, LAN T, et al. Radar main-lobe jamming suppression and identification based on robust whitening blind source separation and convolutional neural networks[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2021, 16(3): 552–563.
 - [5] WANG X T, HUANG T Y, LIU Y M. Resource allocation for random selection of distributed jammer towards multistatic radar system[J]. IEEE Access, 2021, 9: 29048–29055.
 - [6] TU Y C, ZHAO H C, ZHOU X G. Performance analysis of anti aiming noise AM jamming for pseudo-random code phase modulation and PAM combined fuze[C]//Proc. of the IEEE International Symposium on Microwave, 2007: 1171–1174.
 - [7] LYU D Z, CHE Y T, LI C J. Frequency spot jamming against FMICW[C]//Proc. of the IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering, 2019: 68–72.
 - [8] LYU B, ZHANG X F, WANG C, et al. Study of channelized noise frequency-spot jamming techniques[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2008(5): 464–467.
 - [9] XING W G, ZHOU C R, WANG C L. Modified OMP method for multi-target parameter estimation in frequency-agile distributed MIMO radar[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2022, 33(5): 1089–1094.
 - [10] ZHOU R X, XIA G F, ZHAO Y, et al. Coherent signal processing method for frequency-agile radar[C]//Proc. of the IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2015: 464–467.
 - [11] ZENG L, ZHANG Z J, WANG Y L, et al. Suppression of dense false target jamming for stepped frequency radar in slow time domain[J]. Science China Information Sciences, 2022, 65(3): 283–285.
 - [12] HUANG P H, DONG S S, LIU X Z, et al. A coherent integration method for moving target detection using frequency agile radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(2): 206–210.
 - [13] LI X B, YANG R J, WEI C. Integrated radar and communication based on multicarrier frequency modulation chirp signal[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(2): 406–412.
 - [14] GU C, ZHANG J D, ZHU X H. Signal processing and detecting for multicarrier modulated radar system based on OFDM[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(6): 1298–1300.
 - [15] ZHAO Y J, TIAN B, WANG C Y, et al. Analysis of multicarrier frequency diverse array radar over time[J]. IET Signal Processing, 2022, 4(16): 400–412.
 - [16] CAO H J, CHEN F B, ZHANG J, et al. Study on a new nonuniform frequency density multicarrier radar signal and its performances[C]//Proc. of the IEEE International Conference on Communication Problem-solving, 2016.
 - [17] 全英汇, 方文, 高霞, 等. 捷变频雷达导引头技术现状与发展趋势[J]. 航空兵器, 2021, 28(3): 1–9.
 - QUAN Y H, FANG W, GAO X, et al. Review on frequency agile radar seeker[J]. Aero Weaponry, 2021, 28(3): 1–9.
 - [18] QUAN Y H, FANG W, SHA M H, et al. Present situation and prospects of frequency agility radar wave form countermeasures[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(11): 3126–3136.
 - [19] 王勇. 频率捷变雷达抗海杂波性能分析[J]. 战术导弹技术, 2016(4): 98–103.
 - WANG Y. Sea clutter resistance performance analysis of FAR[J]. Tactical Missile Technology, 2016(4): 98–103.
 - [20] 沈健君, 刘晓斌, 艾小锋, 等. 宙斯盾雷达典型信号处理方法仿真分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(3): 228–234.
 - SHEN J J, LIU X B, AI X F, et al. Simulation analysis of typical signal's processing methods of aegis radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022, 20(3): 228–234.
 - [21] WANG X S, LIU J C, ZHANG W M, et al. Mathematical principle of intermittent sampling repeater interference[J]. Science China Information Sciences, 2006, 36(8): 891–901.
 - [22] 刘晓斌. 雷达半实物仿真信号收发处理方法及应用研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
 - LIU X B. Methods and applications of signal transmitting and receiving in radar hardware-in-the-loop simulation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
 - [23] LIU X, LIU J, ZHAO F, et al. Performance analysis of pulse radar target probing based on non-ideal interrupted transmitting and receiving in RFS[C]//Proc. of the IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing, 2017.
 - [24] LIU X B, LIU J, ZHAO F, et al. An equivalent simulation method for pulse radar measurement in anechoic chamber[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2017, 14(7): 1081–1085.
 - [25] LIU X B, LIU J, ZHAO F, et al. A novel strategy for pulse radar HRRP reconstruction based on randomly interrupted transmitting and receiving in radio frequency simulation[J]. IEEE Trans. on Antennas & Propagation, 2018, 66(5): 2569–2580.
 - [26] 谢艾伦, 刘晓斌, 赵锋, 等. 辐射式仿真中 PCM 信号间歇收发回波重构方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(3): 771–776.
 - XIE A L, LIU X B, ZHAO F, et al. Reconstruction method of PCM signal intermittent sending and receiving echo in radiation simulation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(3): 771–776.
 - [27] XIE A L, LIU X B, ZHAO F, et al. Waveform design and processing method of pulse signal in anechoic chamber measurement[J]. Measurement, 2022, 203: 111938.
 - [28] LIU X B, ZHAO F, AI X F, et al. Pulse radar randomly interrupted transmitting and receiving optimization based on genetic algorithm in radio frequency simulation[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal, 2021, 1(9): 1–15.

[29] LIU X B, XIE A L, ZHAO F, et al. Radar pulse signal design and imaging method based on coded modulation[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1–13.

[30] LIU X B, ZHAO F, XIE A L. Target measurement in radio frequency simulation using code-interrupted transmitting and receiving of pulse signal[J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2023, 5(71): 4451–4460.

[31] 吴其华. SAR 宽带雷达信号间歇采样调制方法及应用研究[D]. 长沙：国防科技大学，2019.

WU Q H. Study on approaches and applications of interrupted sampling modulation on wideband radar signals[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.

作者简介

刘振钰(1987—),男,博士研究生,主要研究方向为雷达信号处理。

刘晓斌(1990—),男,副教授,硕士研究生导师,博士,主要研究方向为雷达系统仿真、雷达信号处理。

赵 锋(1978—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为雷达电子战建模与仿真。

徐志明(1995—),男,讲师,博士,主要研究方向为空间监视、目标识别。

谢艾伦(1997—),男,博士研究生,主要研究方向为雷达信号处理。

肖顺平(1964—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为雷达电子战仿真与评估。