

SSC 移频算法的改进型间歇采样转发干扰

连 振, 白渭雄, 付孝龙, 白 娟

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 针对间歇采样转发干扰空间分布特性较差, 而传统移频处理暴露干扰特征及无法应对调频斜率捷变的弱点, 提出应用 SSC 移频算法改进的间歇采样转发干扰。首先从雷达模糊函数出发推导假目标表达式, 分析该干扰方法存在假目标的空间分布缺陷, 然后利用 N 阶频谱扩展-压缩盲移频算法, 通过对信号及其延迟进行 N 倍和 $N-1$ 倍频谱扩展, 利用后者对前者频谱压缩从而得到前移假目标。经理论分析与仿真验证, 这种改进方法能有效优化间歇采样转发干扰的欺骗干扰假目标空间分布, 且相比直接移频处理, 不需要雷达信号先验知识、不会暴露移频特征, 可以有效对抗调频斜率捷变雷达。

关键词 线性调频; 间歇采样转发干扰; 移频干扰; SSC 算法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.01.011

中图分类号 TN957 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)01-0060-05

Improved Interrupted-sampling Repeater Jamming Based on Spectrum Spread and Compression Algorithm

LIAN Zhen, BAI Weixiong, FU Xiaolong, BAI Juan

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Aimed at the problems that the spatial distribution of interrupted-sampling and repeater jamming is not ideal, and the traditional frequency shift methods are hardly utilized for dealing with characteristics of interference, a spectrum spread and compression (SSC) algorithm is used to change this situation. This paper analyzes the expression of fake target based on ambiguity function. Then a SSC algorithm is used to produce advance interferences. The theory and simulation results show that this proposed method is able to improve the spatial distribution of this kind of interference. What's more, compared with the direct frequency shift, this method can be effectively confronted by the frequency modulation slope agility radar without prior knowledge.

Key words: liner frequency modulated; interrupted-sampling and repeater jamming; frequency shift jamming; spectrum spread and compression algorithm

采用线性调频(Liner Frequency Modulated, LFM)信号工作的脉冲压缩雷达较好地解决了传统雷达探测距离与距离分辨率的矛盾, 在防空作战系

统中得到广泛应用, 因此针对 LFM 脉冲压缩雷达的干扰与抗干扰一直是雷达对抗领域的热点问题^[1]。由于脉冲压缩雷达的高相干处理增益, 非相

收稿日期: 2017-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(61601503)

作者简介: 连 振(1994—), 男, 山西临汾人, 硕士生, 主要从事信息对抗理论与技术研究. E-mail: 364964370@qq.com

引用格式: 连振, 白渭雄, 付孝龙, 等. SSC 移频算法的改进型间歇采样转发干扰 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(1): 60-64. LIAN Zhen, BAI Weixiong, FU Xiaolong, et al. Improved Interrupted-sampling Repeater Jamming Based on Spectrum Spread and Compression Algorithm [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(1): 60-64.

于干扰功率损失极大,干扰方法的研究主要集中在相干干扰上,目前主要有转发干扰、移频干扰、灵巧噪声干扰等^[2]。间歇采样转发干扰(Interrupted-Sampling and Repeater Jamming, ISRJ)巧妙利用脉冲压缩雷达的匹配滤波过程,无需知道信号先验参数,对 LFM 信号进行间歇采样然后转发,可以产生多个相干假目标,适当选择参数与转发顺序可以产生超前假目标串,可以对 LFM 脉冲压缩雷达进行欺骗干扰或压制干扰^[3-5],但间歇采样直接转发干扰由于其固有延迟与器件延迟影响,滞后假目标能量总是高于超前假目标,在干扰机功率有限时,低功率超前假目标可能无法起到有效干扰,且有效假目标数量较少^[6]。

针对这一问题,已有许多文献提出了改进算法:文献[7]结合正弦加权调频干扰对 ISRJ 进行了改进,增加了假目标数量但降低了假目标功率,在压制性能上有所提升,但参数选择困难且削弱了其欺骗性能;文献[8]通过调整转发顺序提出了循环转发重复转发等,但大功率假目标位置仍在目标后,无法改善假目标功率分配;文献[9]结合时域卷积灵巧噪声对 ISRJ 进行了改进,易于实现但与正弦加权 ISRJ 存在同样的问题。本文结合移频干扰方法中的 SSC 移频算法,可以在无需信号先验信息前提下将间歇采样转发干扰产生的假目标群主峰前移固定距离,优化干扰机功率分配同时避免固定移频方法容易被识别和被捷变频雷达抑制的缺陷,可结合重复或循环转发提升干扰的欺骗与压制效果。

1 间歇采样转发干扰模型

间歇采样转发干扰首先利用间歇采样信号对信号进行采样,采样信号为矩形脉冲,其时序图见图 1。

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

式中: T_s 为采样周期,对应采样频率为 f_s ; τ 为采样脉冲宽度。根据采样结果转发顺序不同可以形成间歇采样直接转发干扰,间歇采样重复转发干扰、间歇采样循环转发干扰等。本文主要讨论间歇采样直接转发干扰,但对其余二者同样适用。

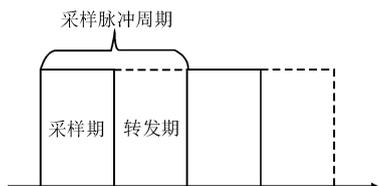


图 1 间歇采样直接转发时序

Fig. 1 Timing of interrupt sampling signal

设雷达发射宽带线性调频脉冲信号为:

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2} k t^2\right)\right] \quad (2)$$

式中: T 为脉冲宽度, $k > 0$ 为调频斜率,且 $T > T_s$ 。可以证明载频大小不影响信号包络幅度,为讨论方便,令载频 $f_0 = 0$ 。直接转发干扰信号为采样信号与雷达信号相乘:

$$x_i(t) = s(t)r(t) \quad (3)$$

根据傅里叶变换性质,信号相乘等价于频域卷积,而采样信号矩形脉冲的频谱为冲击函数串,因此间歇采样结果频谱可以理解为信号频谱在采样信号冲击频谱位置的搬移,即频移,频移以 nf_s ($n \in N$) 为单位。负型雷达模糊函数可以反映信号频移后的匹配滤波结果,因此可以通过负型雷达模糊函数得到干扰信号的匹配滤波结果。

已知 LFM 信号 $s(t)$ 的模糊函数为:

$$\chi(\tau, f_d) = e^{j\pi f_d \left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right)} \text{sinc}\left[\pi T(k\tau + f_d)\left(1 - \frac{|\tau|}{T}\right)\right] \quad (4)$$

式中: τ 和 f_d 分别代表模糊函数中的时延和频移,反映目标的位置和速度信息, $\text{sinc}(x) = (\sin x)/x$ 为辛克函数。

设第 n 阶干扰 $y_{ln}(t)$ 为对应频移 nf_s 的干扰信号匹配滤波结果,即:

$$y_{ln}(t) = e^{j\pi n f_s \left(1 - \frac{|t|}{T}\right)} \text{sinc}\left[\pi T\left(k t + \frac{n}{T_s}\right)\left(1 - \frac{|t|}{T}\right)\right] \quad (5)$$

总干扰匹配滤波结果为所有阶次干扰结果之和:

$$y_l(t) = x(t)s^*(-t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{\tau}{T_s} \text{sinc}\left(\frac{n\pi\tau}{T_s}\right) [s^*(-t)s(t)e^{j2\pi n f_s t}] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{\tau}{T_s} \text{sinc}\left(\frac{n\pi\tau}{T_s}\right) y_{ln}(t) \quad (6)$$

结合式(5)和式(6)分析得出结论:各阶干扰信号的匹配滤波结果近似为辛克函数,第 n 阶干扰经匹配滤波的结果在 $t_{\max} = -n/kT_s$ 处取得峰值。

根据上述分析,若考虑转发信号固有延迟 τ 及器件运算延迟,ISRJ 假目标中能量最大的主峰(0 阶干扰)总是滞后于真实目标,而在实施自卫式干扰时,受干扰机功率限制,干扰主峰滞后对干扰效果影响较大。为使能量最强的假目标前移,可以考虑对 ISRJ 进一步增加移频处理,通过 LFM 脉冲压缩雷达距离——多普勒耦合现象使 0 阶干扰前移。

根据 LFM 信号模糊函数,频移产生的假目标偏移距离 $\Delta R = -c\Delta f/2k$,常规移频处理仅控制频移量 Δf ,已有对抗算法可以针对干扰中的移频量进

行干扰识别^[10-11],若目标雷达为调频斜率捷变雷达或具有多个调频斜率的频率分集雷达,假目标距离便随之跳变,在脉冲累积作用下被抑制。为得到固定偏移距离的假目标,必须使频移与调频斜率成正比,而实际对抗中,迅速准确测量信号调频斜率十分困难。采用 SSC 移频算法可在隐藏移频量干扰特征的同时,无须测量信号调频斜率达到使假目标偏移固定距离的目的。

2 SSC 移频干扰算法

SSC 移频算法利用线性调频信号 $N(N \geq 2)$ 次幂运算提升调频斜率,到达目标频率后再乘以 $N-1$ 次幂共轭信号恢复原始调频斜率,对 LFM 信号进行盲移频处理。具体处理流程见图 2。

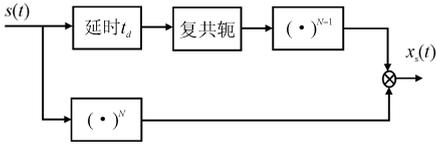


图 2 SSC 移频处理流程

Fig. 2 Process flow chart of SSC algorithm

根据图 2,输入信号为 $s(t)$,最终干扰信号表示为

$$x_s(t) = [s(t)]^N [s^*(t - t_d)]^{N-1} = \text{rect}\left(\frac{t - t_d}{T - t_d}\right) s(t) \exp(j2\pi N k t_d t) \quad (7)$$

将算法应用在间歇采样转发干扰中,输入信号为 $x_i(t)$,代入式(7)可得:

$$x_{Is}(t) = [x_i(t)]^N [x_i^*(t - t_d)]^{N-1} = [s(t)r(t)]^N [s^*(t - t_d)r(t - t_d)]^{N-1} =$$

$$y_s(t) = x_s(t) s^*(-t) =$$

$$\begin{cases} \frac{t+T-t_d}{T} \text{sinc}[\pi k(N-1)t_d(t+T-t_d)] \exp[j2\pi k(N-1)t_d + j\Delta\varphi_n - j\pi k(N-1)t_d(t-t_d)], & t_d - T < t \leq 0 \\ \frac{T-t_d}{T} \text{sinc}[\pi k(N-1)t_d(T-t_d)] \exp[j2\pi k(N-1)t_d + j\Delta\varphi_n - j\pi k(N-1)t_d(2t-t_d)], & 0 < t \leq t_d \\ \frac{T-t}{T} \text{sinc}[\pi k(N-1)t_d(T-t)] \exp[j2\pi k(N-1)t_d + j\Delta\varphi_n - j\pi k(N-1)t_d t], & t_d < t \leq T/2 \end{cases} \quad (10)$$

结合 $r'(t)$ 的频谱搬移效果与 $x_s(t)$ 的匹配滤波结果^[12]可以得到改进后间歇采样转发干扰的第 n

$$y_{Isn}(t) = y_s(t) \exp(j2\pi n f_s t) =$$

$$\begin{cases} \frac{t+T-t_d}{T} \text{sinc}[\pi(\Delta f_n + kt)(t+T-t_d)] \exp[j\pi t(2\Delta f_n + kt) + j\Delta\varphi_n - j\pi(\Delta f_n + kt)(t-t_d)], & t_d - T < t \leq 0 \\ \frac{T-t_d}{T} \text{sinc}[\pi(\Delta f_n + kt)(T-t_d)] \exp[j\pi t(2\Delta f_n + kt) + j\Delta\varphi_n - j\pi(\Delta f_n + kt)(2t-t_d)], & 0 < t \leq t_d \\ \frac{T-t}{T} \text{sinc}[\pi(\Delta f_n + kt)(T-t)] \exp[j\pi t(2\Delta f_n + kt) + j\Delta\varphi_n - j\pi(\Delta f_n + kt)(t)], & t_d < t \leq T/2 \end{cases} \quad (11)$$

$$x_s(t)r(t)r(t-t_d) \quad (8)$$

与全脉冲 SSC 算法不同,根据 t_d 的取值与间歇采样脉冲宽度的关系,可以分为 2 种情况讨论,见图 3。

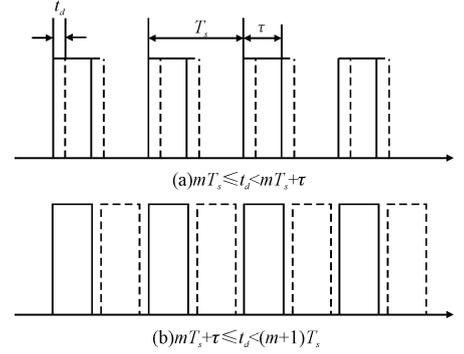


图 3 脉冲位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pulse position

若 $mT_s \leq t_d < mT_s + \tau$,此时令:

$$r'(t) = r(t)r(t-t_d) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{rect}\left(\frac{t - (t_d - mT_s)/2 - nT_s}{\tau - (t_d - mT_s)}\right) \quad (9)$$

则 $x_{Is}(t) = x_s(t)r'(t)$ 。

若 $mT_s + \tau \leq t_d < (m+1)T_s$,此时信号共轭的 $N-1$ 次幂经过延迟落在信号 N 次幂的间歇期,两者无重叠部分,乘积为 0,应避免出现。

经上述分析可知,采用 SSC 算法改进的间歇采样转发干扰可以看作首先将雷达信号进行 SSC 算法移频处理得到干扰信号 $x_s(t)$,然后用脉冲宽度为 $\tau' = \tau - t_d$ 的采样脉冲 $r'(t)$ 对 $x_s(t)$ 间歇采样的结果,其经过匹配滤波器输出结果可以由 $x_s(t)$ 的匹配滤波结果经频谱搬移得到,已知 $x_s(t)$ 的匹配滤波结果为:

$$y_{Isn}(t) = y_s(t) \exp(j2\pi n f_s t) =$$

式中:

$$\begin{aligned} \Delta f_n &= k(N-1)t_d + nf_s \\ \Delta \varphi_n &= -\pi k(N-1)t_d^2 + \varphi' \end{aligned} \quad (12)$$

可以看出,随着 t_d 取值变化,干扰信号匹配滤波结果主峰位置由原来的 $t_{\max} = -n/kT_s$ 变为 $t_{J\max} = -n/kT_s - (N-1)t_d$ 。改进后的干扰主峰有一定幅度损失和展宽,但位置前移且可不受雷达调频斜率捷变影响。

考虑转发脉冲固有延迟 τ ,为使干扰信号主峰超前目标信号,且主峰幅度超过传统间歇采样转发干扰原有超前假目标幅度,结合 t_d 与间歇采样脉冲间的关系,对 SSC 算法延迟量 t_d 和阶数 N 应有如下约束:

$$\begin{cases} (N-1)t_d > \tau \\ \left| \frac{\tau'}{T_s} \left(1 - \frac{Nt_d}{T_s}\right) \right| > \left| \frac{\tau}{T_s} \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi\tau}{T_s}\right) \left(1 - \frac{1}{BT_s}\right) \right| \\ mT_s \leq t_d < mT_s + \tau \end{cases} \quad (13)$$

具体应用时可依照上述约束判断此时的改进间歇采样转发干扰超前假目标能量是否有所改善。

3 仿真分析

3.1 间歇采样直接转发干扰仿真

设置雷达发射线性调频信号带宽 5 MHz,脉冲宽度 $100 \mu\text{s}$,干扰机采样周期分别设置为 $4 \mu\text{s}$ 、 $8 \mu\text{s}$,占空比分别设置为 0.5、0.25,进行间歇采样直接转发干扰,分析采样周期与占空比对干扰效果影响。系统延迟仅考虑转发固有延迟,以目标出现时间为时间零点。仿真干扰效果见图 4,其中虚线代表干扰信号,时间 0 点处实线为目标信号。

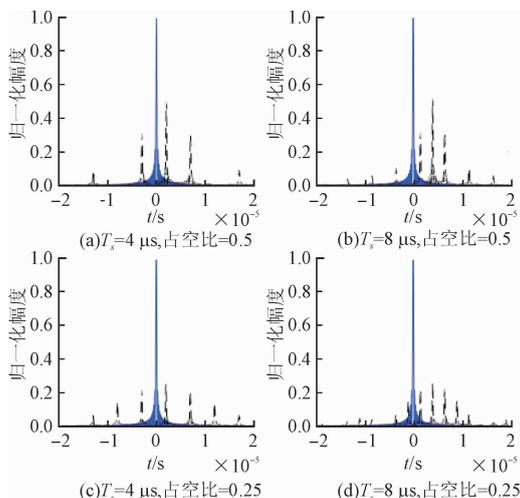


图 4 间歇采样转发干扰输出

Fig. 4 Simulation of ISRJ output

分析图 4 可以得出:间歇采样直接转发干扰可

以在雷达目标前后产生一系列以 0 阶假目标对称分布的假目标信号;假目标幅度在 3 到 5 阶以后迅速衰减;0 阶假目标幅度不受采样周期限制而受占空比影响;假目标幅度最大的主峰位于目标之后。实际应用中,主峰位置滞后导致对目标的欺骗效果变差,这点文献[6]也已经指出,需要进行改进。

3.2 SSC 移频与直接移频假目标对比

对采样周期 $4 \mu\text{s}$,占空比 0.5 的干扰信号采用 SSC 移频和传统移频产生相同 Δf ,其中算法阶 SSC 数为 2,效果见图 5。

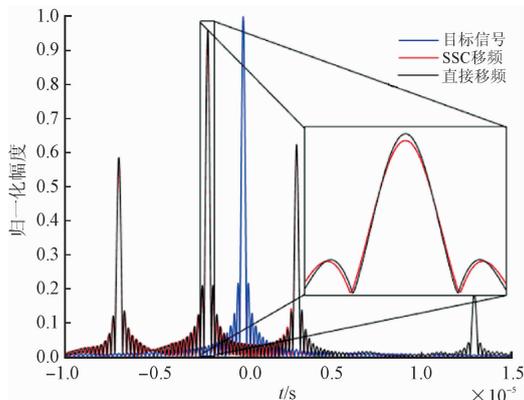


图 5 2 种移频方法输出效果对照

Fig. 5 Comparison of two frequency shift methods

分析图 5 可以得出下列结论:直接移频与 SSC 移频均可以改善间歇采样直接转发干扰效果,产生更大功率的超前假目标。相比直接移频处理,SSC 移频产生的假目标功率有轻微损失且脉冲宽度轻微展宽,但 SSC 移频处理后的干扰无调频干扰特征,且事先不需要测量调频斜率就可以直接控制假目标移动位置,更难被一般对抗措施检测。

3.3 SSC 移频对抗调频斜率捷变效果

线性调频脉冲压缩雷达调频斜率捷变有 3 种实现方式:①带宽不变,改变脉冲宽度;②脉冲宽度不变,改变带宽;③时宽带宽都发生变化^[5]。根据前 2 种调频斜率捷变模式进行仿真验证 SSC 移频间歇采样转发干扰应对调频斜率捷变雷达时干扰效果。

令时宽固定为 $100 \mu\text{s}$,带宽由 5 MHz 到 20 MHz 随机跳变,累积 10 个脉冲结果如图 6(b)、6(d);令带宽固定为 5 MHz,时宽由 $50 \mu\text{s}$ 到 $150 \mu\text{s}$ 随机变换,累积 10 个脉冲结果如图 6(a)、6(c),其中(a)与(b)为 SSC 移频,(c)与(d)为直接移频。

对照传统移频与 SSC 移频后的间歇采样直接转发干扰脉冲累积结果,调频斜率捷变可有效抑制传统移频后的间歇采样直接转发干扰,SSC 移频后间歇采样直接转发干扰虽然高阶假目标群被抑制,但 0 阶假目标幅度不受影响,仍可产生足够强度假目标实现欺骗干扰。

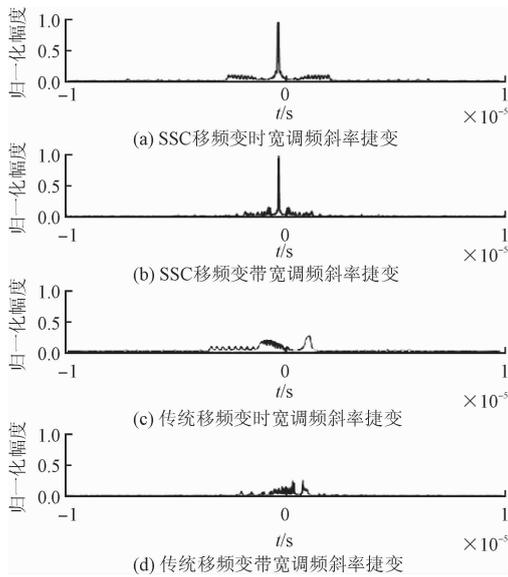


图6 调频斜率捷变累积输出

Fig. 6 The cumulative output under agility slope of liner frequency modulation

4 结语

本文在传统间歇采样直接转发干扰的基础上,利用 SSC 移频算法对干扰信号进行改进,推导了经过 SSC 移频的干扰信号经过匹配滤波的输出结果,对算法参数选择进行了约束。理论分析与仿真表明,通过 SSC 移频算法对干扰信号进行盲移频,不需要雷达信号的先验知识,可以改善假目标的空间分布,优化干扰机功率分配,能更有效地形成抗脉冲调频斜率捷变的超前假目标,较好地隐藏干扰特征,且合理选择参数可以减小采用该方法引起的功率损失和脉冲展宽,相比直接移频处理更加具有实战应用价值。

参考文献(References):

[1] SCHLEHER D C. *Electronic Warfare in the Information Age* [M]. Boston: Artech House, 1999.

[2] 唐斌, 赵源, 蔡天一, 等. 雷达抗有源干扰技术现状与展望 [J]. *数据采集与处理*, 2016, 31(4): 623-639.
TANG B, ZHAO Y, CAI T Y, et al. *Advances and Perspectives in Radar ECCM Techniques of Active Jamming* [J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2016, 31(4): 623-639. (in Chinese)

[3] 王雪松, 刘建成, 张文明, 等. 间歇采样转发干扰的数学原理 [J]. *中国科学(信息科学)*, 2006, 36(8): 891-901.
WANG X S, LIU J C, ZHANG W M, et al. *Mathematical Principle of Intermittent Sampling Repeater Jamming* [J]. *Science China(Information Science)*, 2006, 36(8): 891-901. (in Chinese)

[4] SPARROW M J, CIKALO J. *ECM Techniques to Counter Pulse Compression Radar*; US, US 7081846

B1[P]. 2006.

[5] 冯德军, 陶华敏, 杨勇, 等. 对去斜体制雷达的间歇采样转发干扰 [J]. *中国科学(信息科学)*, 2012, 42(2): 186-195.
FENG D J, TAO H M, YANG Y, et al. *Jamming De-chirping Radar Using Interrupted-Sampling Repeater* [J]. *Science China(Information Science)*, 2012, 42(2): 186-195. (in Chinese)

[6] 冯德军, 杨勇, 徐乐涛. 间歇采样转发假目标对 CFAR 检测影响分析 [J]. *国防科技大学学报*, 2016, 38(1): 63-68.
FENG D J, YANG Y, XU L T. *Impact Analysis of CFAR Detection for Active Decoy Using Interrupted-sampling Repeater* [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(1): 63-68. (in Chinese)

[7] 谭铭, 王春阳, 李欣. 基于间歇采样的正弦加权调频干扰研究 [J]. *计算机仿真*, 2016, 33(8): 7-11.
TAN M, WANG C Y, LI X. *Sinusoidal Weighted Frequency Modulation Jamming Technique Based on Intermittent-sampling Repeater* [J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(8): 7-11. (in Chinese)

[8] 刘忠, 王雪松, 刘建成, 等. 基于数字射频存储器的间歇采样重复转发干扰 [J]. *兵工学报*, 2008, 29(4): 405-410.
LIU Z, WANG X S, LIU J C, et al. *Jamming Technique of Interrupted-Sampling and Periodic Repeater Based on Digital Radio Frequency Memory* [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(4): 405-410. (in Chinese)

[9] 郭雷, 李宏, 李青山. 相参雷达间歇采样灵巧干扰方法 [J]. *现代防御技术*, 2013, 41(3): 119-124.
GUO L, LI H, LI Q S. *Interrupted Sampling Smart Jamming Method for Coherent Radar* [J]. *Modern Defence Technology*, 2013, 41(3): 119-124. (in Chinese)

[10] BLAIR W D, BRANDT-PEARCE M. *Discrimination of Targets and RGPO Echoes Using Frequency Diversity* [C] // *Proceedings of the Twenty-Ninth South-eastern Symposium on. IEEE*, 2002: 509.

[11] LU G, ZENG D, TANG B. *Anti-jamming Filtering for DRFM Repeat Jammer Based on Stretch Processing* [C] // *International Conference on Signal Processing Systems. IEEE*, 2010: V1-78-82.

[12] 王玉军, 赵国庆. 对 LFM 雷达的 N 阶 SSC 盲移频干扰算法 [J]. *电路与系统学报*, 2011, 16(4): 70-74.
WANG Y J, ZHAO G Q. *Blind Nth-order SSC Shift-Frequency Jamming to LFM Radar* [J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2011, 16(4): 70-74. (in Chinese)

[13] WAN X S, WANG J C. *Mathematic Principles of Interrupted-Sampling Repeater Jamming (ISRJ)* [J]. *Science China(Information Sciences)*, 2007, 50(1): 113-123.

[14] FENG D, XU L, PAN X, et al. *Jamming Wideband Radar Using Interrupted-Sampling Repeater* [J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2017, 53(3): 1341-1354.

[15] QI S, ZHAO X, TAO R, et al. *Multiple False Target Jamming against Wideband Linear Frequency Modulated Signal* [C] // *International Conference on Electronics Information and Emergency Communication, IEEE*, 2014: 201-204.

(编辑: 徐敏)