

DOI: 10.3969/j.issn.1672-2337.2018.03.013

# 间歇采样灵巧噪声重复转发干扰研究

吴筑莉, 熊 鑫, 余国文, 郭淑芬

(空军预警学院, 湖北武汉 430019)

**摘要:** 为研究如何对线性调频脉冲压缩雷达进行有效干扰, 针对间歇采样重复转发干扰假目标分布相对均匀易被雷达识别、次假目标群衰减较大等问题, 提出一种间歇采样灵巧噪声重复转发干扰。首先, 从理论上分析了基于间歇采样的灵巧噪声重复转发干扰效果, 然后进行了仿真实验。结合理论分析和仿真实验结果可知, 间歇采样灵巧噪声转发干扰在具备原间歇采样重复转发干扰特性的基础上, 使假目标幅度和分布随机, 不易被雷达识别。同时, 通过灵巧噪声卷积调制, 干扰无需测频自动瞄准雷达信号, 干扰能量利用率高, 明显优于传统的射频噪声干扰; 通过调节噪声时宽, 可以有效选择进行欺骗干扰或压制干扰, 干扰方式较为灵活。

**关键词:** 数字射频存储技术; 匹配滤波; 间歇采样; 重复转发干扰; 灵巧噪声

中图分类号: TN974; TN972<sup>+</sup>.1 文献标志码:A 文章编号: 1672-2337(2018)03-0311-06

## Research on Smart Noise Jamming Based on Interrupted-Sampling and Periodic Repeater Techniques

WU Zhuli, XIONG Xin, YU Guowen, GUO Shufen  
(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** In order to study how to make effective jamming to linear frequency modulated pulse compression radar, a kind of interrupted-sampling smart noise periodic repeater jamming is proposed to solve the problems that the false targets are distributed evenly and easily identified by radars and the secondary target groups are attenuated quickly for interrupted-sampling periodic repeater jamming. First of all, the effect of periodic repeater jamming of smart noise has been studied theoretically based on interrupted-sampling and then the simulation experiment is carried out. Combining the theoretical analysis and simulation results, it can be seen that the jamming not only has the characteristics of the original interrupted-sampling periodic repeater jamming, but also can make the false targets and their amplitude distributed randomly, rendering radar recognition more challenging. At the same time, through the smart noise convolution modulation, the jamming can automatically zero in on the radar signal without measuring frequency, hence having higher utilization ratio of the jamming energy, which is significantly better than the traditional RF noise jamming. Furthermore, noise time width adjustment contributes to flexible transition between deceptive jamming and suppressive jamming.

**Key words:** digital radio frequency memory (DRFM); matched filtering; interrupted-sampling; periodic repeater jamming; smart noise

## 0 引言

现代雷达系统为有效增加抗干扰能力、提高目标识别能力, 普遍采用线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)等脉冲压缩技术来解

决探测距离和距离分辨率之间的矛盾关系, 对雷达回波进行脉冲压缩可获得较高的相干处理增益, 有效提高了系统抗杂波和非相干干扰的能力<sup>[1-2]</sup>。因此如何对 LFM 信号进行有效的相干干扰已成为雷达电子战领域的研究热点。

目前, 相干干扰的干扰样式较多, 主要分为全

脉冲转发干扰和间歇采样调制转发干扰<sup>[2-3]</sup>, 其实现基础主要为数字射频存储器(DRFM)技术<sup>[4]</sup>。全脉冲转发干扰<sup>[5]</sup>优势在于可以产生很逼真的假目标, 但对大时宽雷达进行干扰时, 干扰信号总是滞后于真实目标回波信号一个脉冲宽度。间歇采样调制转发干扰就可以有效解决这个问题, 它使用雷达发射信号进行间歇采样再调制转发的方式, 有效利用匹配滤波技术产生较逼真的相干假目标串。在这类干扰中, 基于间歇采样直接转发干扰, 文献[6]提出了间歇采样重复转发干扰, 有效解决了直接转发干扰中次假目标衰减较大、干扰工作比较低等问题, 但是该干扰产生的多假目标分布较为均匀, 易被雷达识别, 假目标不混叠时次假目标群衰减较大, 压制干扰特性较差。本文基于 LFM 脉压雷达信号处理的特性, 提出一种间歇采样灵巧噪声重复转发干扰技术, 即将干扰机间歇采样并存储的部分雷达发射信号与视频噪声信号相卷积后再转发。从干扰产生机理上看, 这种干扰无需测频就可以自动瞄准雷达信号频率, 并且能有效利用匹配滤波特性, 获得相干处理增益; 从干扰效果上看, 这种干扰能产生较逼真的多假目标干扰, 假目标的幅度和分布较为随机, 有效解决了间歇采样重复转发干扰次假目标分布均匀和次假目标群衰减较大的不足。同时, 通过调节噪声卷积的宽度, 能灵活选择进行欺骗干扰或是压制干扰, 干扰方式选择较为灵活。

## 1 间歇采样重复转发干扰的工作原理

间歇采样重复转发干扰基本工作原理如图 1 所示, 即采样一次后, 将采样多次转发。例如采样 1(一次采样后), 对采样 1 进行 3 次转发得到转发 1-1, 1-2 和 1-3。所以可说明转发 1-1, 2-1, 3-1, ..., n-1 为第一次转发, 1-2, 2-2, 3-2, ..., n-2 为第二次转发, 之后每次转发, 都在前一次转发的基础

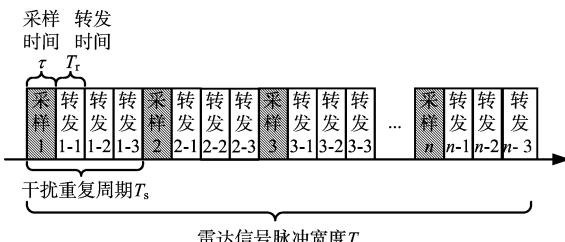


图 1 间歇采样重复转发干扰工作原理

上延时  $T_r$ , 此时转发延时  $T_r=\tau$ 。其中,  $T$  为雷达发射信号脉宽,  $T_s$  为干扰重复周期,  $\tau$  为间歇采样脉宽,  $T_r$  为转发时间间隔。

由上述分析可知, 重复转发干扰的数学模型可在直接转发干扰的模型基础上进行变形得到。设在间歇采样重复周期  $T_s$  中, 采样脉宽为  $\tau$ , 转发延时为  $T_r$  ( $T_r=\tau$ ), 可转发次数为  $M$ , 间歇采样直接转发干扰经过匹配滤波处理后的输出为  $y_s(t)$ , 则  $M=T_s/\tau-1$ , 重复转发干扰输出  $y_{s\text{总}}(t)$  为

$$\begin{aligned} y_{s\text{总}}(t) &= y_s(t) + y_s(t-\tau) + \cdots + \\ &y_s(t-(M-1)\tau) = \\ &\sum_{i=0}^{M-1} y_s(t-i\tau) \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)表明重复转发干扰可以产生多个主假目标和多个有效的次假目标回波, 即会产生多个假目标群(可分为主假目标群和次假目标群), 实际上是直接转发干扰的等间隔  $\tau$  延拓  $M$  次。因此若所有假目标都独立且  $T_s/\tau$  为整数时, 相邻假目标间距  $\Delta l_j=cT/2T_sW$ , 其中  $c$  为光速,  $W$  为雷达发射信号带宽。由于直接转发干扰假目标分布均匀, 次假目标衰减较大, 有效的假目标数量为 3~5 个<sup>[6]</sup>, 重复转发干扰为其延拓干扰, 则可知重复转发干扰的假目标分布也较为均匀, 容易被雷达识别; 假目标间不混叠时, 次假目标群衰减较大; 有效假目标数量为 3M~5M 个。

## 2 间歇采样灵巧噪声重复转发干扰分析

灵巧噪声卷积调制可以产生与目标回波非常相似的干扰信号, 具有较好的欺骗性干扰的特性, 并且由于该干扰样式能将噪声干扰能量集中于雷达信号带宽内, 因此也具有较好的压制性干扰的特性。将灵巧噪声卷积调制与间歇采样重复转发相结合, 使干扰在具有较高的干扰工作比的前提下实现快速转发, 保持较好的相干性和逼真度, 又能使假目标幅度和分布较为随机, 也可以根据需求调整噪声时宽来选择欺骗式或压制式干扰。

### 2.1 干扰产生机理

产生间歇采样灵巧噪声转发干扰的流程如图 2 所示, 具体步骤如下: 1) 对发射信号进行间歇采

样处理;2)对间歇采样信号进行重复转发处理;3)对间歇采样重复转发信号进行灵巧噪声卷积调制处理,使其具有与间歇采样信号相似的干扰特性和噪声的随机特性。

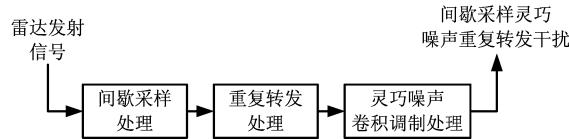


图2 间歇采样灵巧噪声重复转发干扰产生流程图

将雷达发射信号进行如图3所示的间歇采样重复转发处理后,将间歇采样重复转发干扰进行灵巧噪声卷积调制,图3为基于DRFM的灵巧噪声卷积调制方法。

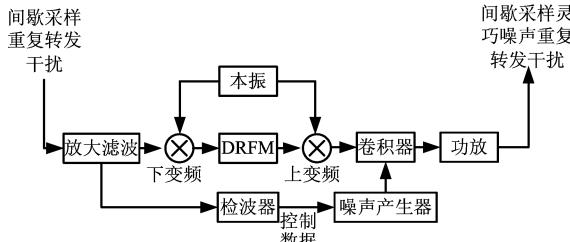


图3 灵巧噪声卷积调制干扰原理框图

被间歇采样重复转发的雷达发射信号一路经接收、放大滤波后,经过下变频送到数字射频存储器(DRFM),处理后再经过上变频输出雷达间歇采样重复转发脉冲复制信号;另一路经过检波产生控制数据,控制噪声产生器产生适当长度和类型的噪声数据,最后将雷达间歇采样重复转发脉冲复制信号与视频噪声信号进行卷积即产生间歇采样灵巧噪声重复转发干扰。因此,这种干扰无需测频就可以自动瞄准雷达信号频率。

为分析间歇采样灵巧噪声重复转发干扰经过脉冲压缩处理后获得的匹配增益,使用系统干扰功率增益 $K_d$ 和系统干信比增益 $K$ 进行分析<sup>[7]</sup>:

$$K_d = J_o / J_i \quad (2)$$

$$K = (J_o / S_o) / (J_i / S_i) \quad (3)$$

式中, $J_i, J_o$ 和 $S_i, S_o$ 分别为脉冲压缩前后的干扰功率和信号功率。

设雷达信号脉冲宽度为 $T$ ,雷达信号带宽为 $W$ ,视频噪声长度为 $T_n$ ( $T_n \geq 1/W$ ),间歇采样占空比为 $\tau/T_s$ ,间歇采样重复周期为 $T_s$ ,重复转发次数为 $M$ , $M = T_s/\tau - 1$ ,为便于分析,假设子脉冲个数 $N = T/T_s$ 为整数。由于间歇采样转发干扰

信号经过脉压后,与原雷达信号相比存在脉冲宽度展宽,因此设脉压后的间歇采样转发干扰信号宽度为 $T_j$ ,且满足 $1/W < T_j \ll T$ 。可知雷达信号脉冲压缩前后的长度分别为 $T$ 和 $1/W$ ,卷积调制灵巧噪声间歇采样重复转发干扰信号脉冲压缩前后的长度分别为 $M \cdot \frac{\tau}{T_s} \cdot (T_n + T)$ 和 $M \cdot \frac{\tau}{T_s} \cdot (T_n + T_j)$ 。根据能量守恒原理可得

$$S_i \cdot T = S_o \cdot (1/W) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} J_i \cdot [M \cdot \frac{\tau}{T_s} \cdot (T_n + T)] &= \\ J_o \cdot [M \cdot \frac{\tau}{T_s} \cdot (T_n + T_j)] & \end{aligned} \quad (5)$$

所以卷积调制灵巧噪声间歇采样转发干扰的干扰功率增益:

$$K_d = J_o / J_i = \frac{T_n + T}{T_n + T_j} > 1 \quad (6)$$

其干信比增益

$$K = (J_o / S_o) / (J_i / S_i) = \frac{K_d}{D} = \frac{T_n + T}{T_n + T_j} \cdot \frac{1}{D} > \frac{1}{D} \quad (7)$$

式中,脉冲压缩的时宽带宽积 $D = TW$ 。与传统射频噪声干扰对比,传统射频噪声干扰不会获得脉冲压缩处理增益,甚至由于失配而造成能量损失,因此其干扰功率增益 $K_d \leq 1$ ,干信比增益 $K \leq 1/D$ 。由此可知,间歇采样灵巧噪声重复转发干扰比传统射频噪声干扰的干扰能量利用效率更高,并且这种干扰方式能有效利用匹配滤波特性,获得相干处理增益。

此外,从式(6)和式(7)可知,间歇采样灵巧噪声转发干扰的性能与参与卷积的视频噪声长度 $T_n$ 有关, $T_n$ 越小, $K_d$ 和 $K$ 越大,干扰功率利用率越高,但同时干扰输出信号脉冲宽度越小,所以要选择适当的 $T_n$ ,一般选择 $T_n$ 大于 $1/B$ ,这样才能保证干扰输出覆盖住回波目标。

## 2.2 干扰效果分析

设间歇采样灵巧噪声重复转发干扰经过匹配滤波器的输出为 $y_n(t)$ ,视频噪声为 $n(t)$ ,由干扰产生原理可知:

$$\begin{aligned} y_n(t) &= n(t) \otimes y_{\text{s总}}(t) = \\ n(t) \otimes \sum_{i=0}^{M-1} y_s(t - i\tau) & \end{aligned} \quad (8)$$

由文献[8]可知:

$$y_s(t) = \frac{\tau}{T_s} y(t) + \frac{2\tau}{T_s} \left[ \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{\sin n\pi f_s \tau}{n\pi f_s \tau} \right] \cos 2\pi n f_s \tau \cdot y(t) \quad (9)$$

式中,  $\tau$  为间歇采样脉冲宽度,  $T_s$  为干扰重复周期 ( $f_s = 1/T_s$ ),  $y(t)$  为雷达信号  $x(t)$  通过匹配滤波的输出信号。由于  $n(t)$  为幅度和分布随机的噪声信号, 因此可将  $n(t)$  表示为随机脉冲串, 即

$$n(t) = \sum_{l=0}^{L-1} A_l \delta(t - \sum_{j=0}^l t_j) \quad (10)$$

式中:  $L$  为随机参量的个数;  $A_l$  组成  $\{A_l\}$ ,  $\{A_l\}$  为一个随机数序列;  $\delta(t)$  为单位冲击函数;  $t_j$  组成  $\{t_j\}$ ,  $\{t_j\}$  为一个随机数序列, 其取值的下限和上限分别为  $t_{\min}$  和  $t_{\max}$ , 即  $t_j \in [t_{\min}, t_{\max}]$ ,  $t_{\min}$  和  $t_{\max}$  分别为随机脉冲串中脉冲间的最短时间间隔和最长时间间隔,  $t_j$  为随机脉冲串第  $j$  个脉冲的前沿时

刻;  $\sum_{j=0}^{L-1} t_j$  为参与灵巧噪声调制的噪声时宽  $T_n$ 。

由式(8)和式(10)可知:

$$y_n(t) = n(t) \otimes y_{s,\text{总}}(t) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} A_l \delta(t - \sum_{j=0}^l t_j) \otimes y_s(t - i\tau) \quad (11)$$

令  $t' = t - i\tau$ , 则  $t = t' + i\tau$ , 即

$$y_n(t) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} A_l \delta(t' + i\tau - \sum_{j=0}^l t_j) \otimes y_s(t') = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{L-1} A_l y_s(t' + i\tau - \sum_{j=0}^l t_j) \quad (12)$$

结合式(9)可得

$$y_n(t) = \sum_{i=0}^{M-1} \left\{ \frac{\tau}{T_s} \sum_{l=0}^{L-1} A_l y(t + i\tau - \sum_{j=0}^l t_j) + \frac{2\tau}{T_s} \left[ \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{\sin n\pi f_s \tau}{n\pi f_s \tau} \right] \cos 2\pi n f_s \tau \cdot \sum_{l=0}^{L-1} A_l y(t + i\tau - \sum_{j=0}^l t_j) \right\} \quad (13)$$

因此由式(13)可知, 将  $n(t)$  与间歇采样重复转发干扰信号进行卷积, 可以令视频噪声信号得到与间歇采样重复转发干扰类似的信号特征, 使其经过匹配滤波后具有脉压增益。并且由于  $A_l$

和  $\sum_{j=0}^l t_j$  两个随机数序列是假目标幅度、分布和覆盖范围的决定参数之一, 因此该干扰经过匹配滤波后产生的假目标在幅度和分布上具有随机性, 在覆盖范围上可受噪声时宽  $T_n$  的控制。综上所述, 间歇采样灵巧噪声重复转发干扰经过匹配滤波处理后, 可以产生幅度随机、分布随机的多假目

标干扰。同时, 由于其假目标覆盖范围由噪声时宽  $T_n$  决定, 所以可以根据战场态势灵活机动选择欺骗性干扰或压制性干扰。

### 3 干扰仿真

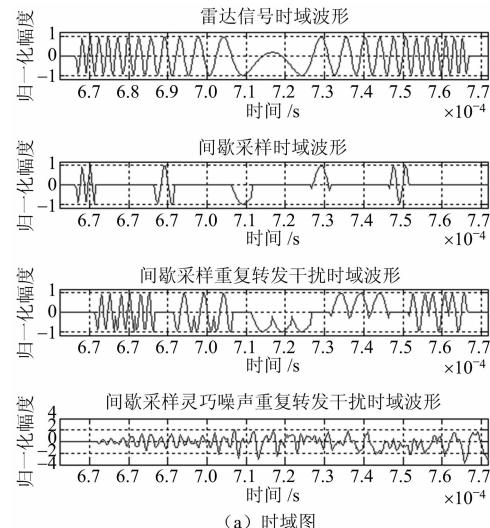
设雷达发射线性调频信号脉宽为  $100 \mu\text{s}$ , 带宽为  $1 \text{ MHz}$ , 干扰机距离雷达  $100 \text{ km}$ , 间歇采样重复周期为  $20 \mu\text{s}$ , 干扰占空比  $\tau/T_s = 0.25$ , 参与卷积的噪声信号是服从均值为  $0$ 、方差为  $1$  的高斯分布噪声, 噪声时宽为  $100 \mu\text{s}$ , 分别对该雷达进行间歇采样重复转发干扰和间歇采样灵巧噪声重复转发干扰。由参数可知, 间歇采样重复转发干扰中所有假目标独立。

#### 3.1 时频域分析

设雷达发射信号  $x(t)$ , 间歇采样信号  $x_s(t)$ , 间歇采样重复转发干扰信号为  $x_j(t)$ , 间歇采样灵巧噪声重复转发干扰信号为  $x_{jn}(t)$  的时域波形如图 4(a)所示。雷达发射信号  $X(f)$ , 间歇采样重复转发干扰信号为  $X_j(f)$ , 间歇采样灵巧噪声重复转发干扰信号为  $X_{jn}(f)$  的频谱如图 4(b)所示。如图 4 所示, 由于灵巧噪声卷积调制, 干扰的时域和频域波形发生了较大变化, 这也是两种干扰效果不同的原因所在。

#### 3.2 干扰效果对比

取噪声时宽  $T_n = 100 \mu\text{s}$ , 与雷达发射信号脉宽相同。



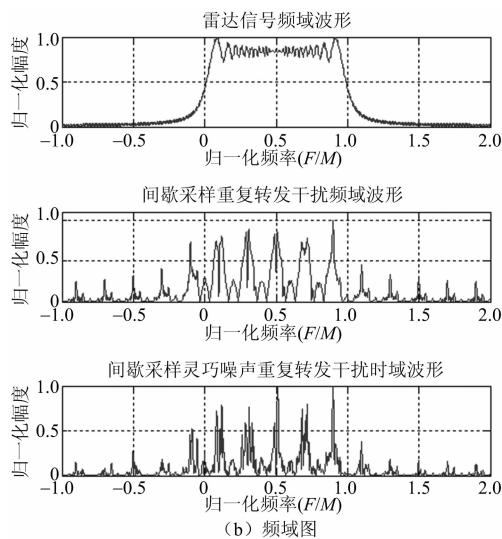
图4  $\tau/T_s=0.25$ 时两种干扰波形的时域和频域对比图

图5(a)为3种信号经过脉压后的距离-归一化幅度二维仿真图,图5(b)为间歇采样灵巧噪声重复转发干扰信号三维图,图5(c)为图5(a)的细节放大图。设假目标个数为*i*,其中*i*为整数,图5(d)为第*i*个假目标与前一假目标距离情况。由于假目标主要分布在90~120 km范围内,对于间歇采样重复转发干扰,假目标个数为20个,即 $1 \leq i \leq 20$ ;对于间歇采样灵巧噪声转发干扰,假目标个数为64个,即 $1 \leq i \leq 64$ 。

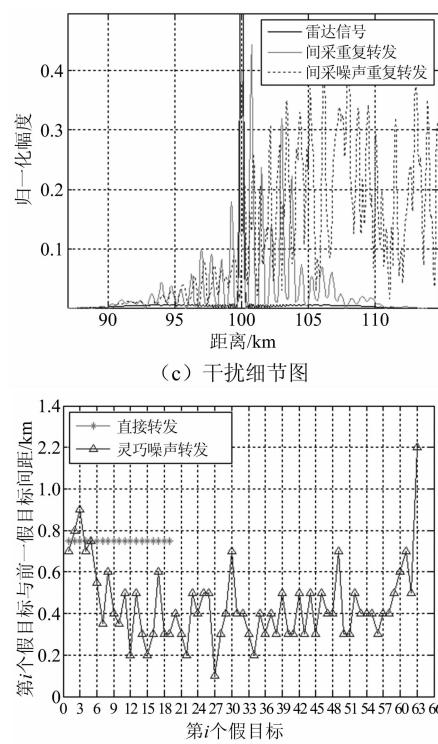
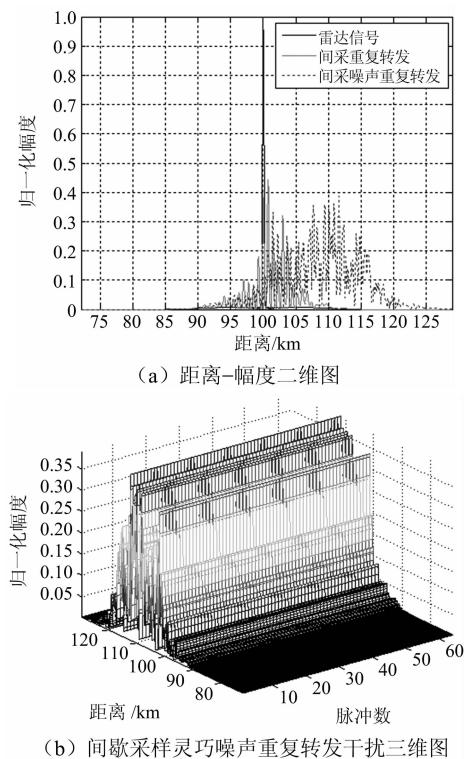


图5 脉冲压缩后雷达信号和干扰信号的仿真分析图

首先对间歇采样重复转发干扰进行分析,由参数设置可知,仿真的所有假目标都是独立的,结合图5(a)、图5(c)和图5(d)中绿实线可看出:

- 1) 间歇采样重复转发干扰假目标分布均匀,容易被雷达识别。各假目标间距为0.75 km,与理论分析相符。
- 2) 次假目标群衰减较大。主假目标群归一化幅度分别为-3.5 dB, -6.3 dB 和 -8.5 dB,位于主假目标群右侧的一次假目标群归一化幅度分别为-4.9 dB, -6.5 dB 和 -11.3 dB,位于主假目标群右侧的二次假目标群归一化幅度分别为-12.6 dB, -11.5 dB 和 -12.1 dB,次假目标群幅度衰减较大,有效的假目标数量为3M~5M个,与理论分析相符。

- 3) 压制干扰特性较差。假目标总数为20个,假目标覆盖为90~110 km,但由于有效的假目标数量为9个,因此干扰的压制特性较差。

对间歇采样灵巧噪声重复转发干扰进行分析,结合图5(a)的红虚线、图5(b)和图5(d)的红实线可看出:

- 1) 间歇采样灵巧噪声重复转发干扰的假目标分布相对随机,即不同假目标与前一假目标的间

距相对随机,较难被雷达识别。

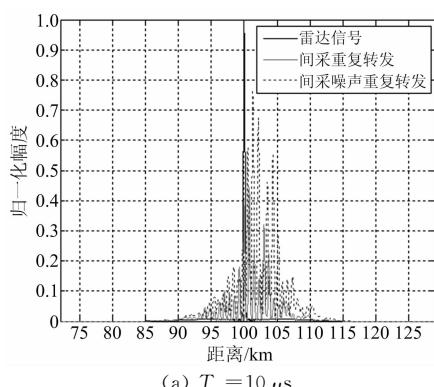
2)假目标幅度随机,因此不存在次假目标衰减的问题。其中,幅度最小的假目标为-21.7 dB,幅度最大的假目标为-3.2 dB,其余假目标幅度在这个范围内随机起伏。

3)压制干扰特性相对较好。假目标总数为 64 个,假目标覆盖为 92~125 km,且假目标幅度随机,因此具有较好的压制干扰特性。

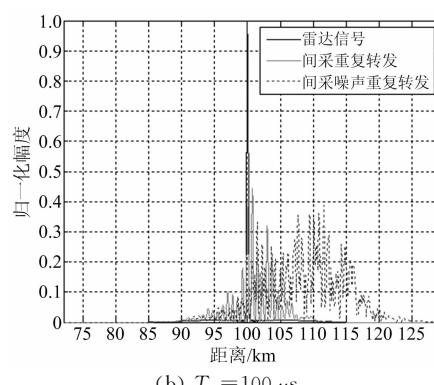
### 3.3 不同噪声时宽的干扰效果分析

噪声时宽分别取  $T_n=10 \mu s$  和  $T_n=100 \mu s$  进行对比仿真实验,验证不同噪声时宽的间歇采样灵巧噪声转发干扰效果。

如图 6 所示,当噪声时宽较小时,干扰幅度增大,欺骗式干扰效果较好;当噪声时宽较大时,干扰幅度减小,假目标覆盖范围增大,压制式干扰效果较好。但是需要注意的是,噪声时宽最小不能小于  $1/W$ ,否则无法覆盖真实目标回波。综上所述,间歇采样灵巧噪声重复转发干扰具有较好的灵活性,可以根据战场实际干扰需求,调节噪声时宽参数,选择欺骗或压制式干扰。



(a)  $T_n=10 \mu s$



(b)  $T_n=100 \mu s$

图 6 不同噪声时宽的间歇采样灵巧噪声重复转发干扰

## 4 结束语

本文基于间歇采样重复转发干扰提出了间歇采样灵巧噪声重复转发干扰,从理论上分析了干扰的产生流程、工作原理和干扰效果,并用仿真进行验证。理论分析和仿真结果表明,从干扰效果角度来看,该干扰具有相干增益,产生的假目标从分布和幅度来说都更具随机性;从干扰应用角度来看,可以通过改变噪声时宽达到调节假目标覆盖范围的目的,干扰更具灵活性,可以随时根据战场态势作出相应调整。由于冲激脉冲串的延时决定了假目标群的位置,因此下一步将研究如何通过控制延时量改变假目标密度。

## 参考文献:

- [1] 林茂庸, 柯有安. 雷达信号理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984: 128-147.
- [2] QI Shibin, ZHAO Xinghao, TAO Ran, et al. Multiple False Target Jamming Against Wideband Linear Frequency Modulated Signal[C]// 4th IEEE International Conference on Electronics Information and Emergency Communication, Beijing: IEEE, 2013: 201-204.
- [3] 柳向, 李东生, 刘庆林. 基于 OS-CFAR 的 LFM 脉压雷达多假目标干扰分析[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(7): 1486-1492.
- [4] 黄思源, 刘东升. 数字射频存储发展综述[J]. 飞航导弹, 2017(8): 77-83.
- [5] WANG Xuesong, LIU Jiancheng, ZHANG Wenming, et al. Mathematic Principles of Interrupted-Sampling Repeater Jamming[J]. Science in China, 2007, 50(1): 113-123.
- [6] 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.
- [7] 朱宁龙. 灵巧噪声干扰与反干扰[J]. 信息安全与技术, 2016, 7(2): 67-68.
- [8] 王雪松, 肖顺平, 冯德军, 等. 现代雷达电子战系统建模与仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 148-149.

## 作者简介:



吴筑莉 女,1994 年生,贵州贵阳人,硕士研究生,主要从事电子对抗技术的研究。

E-mail: wuzhili\_1994@163.com