

对成像雷达的间歇采样非均匀转发干扰方法*

高磊¹, 曾勇虎¹, 汪连栋¹, 王伟²

(1. 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003;

2. 国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 间歇采样转发干扰是针对宽带成像雷达的一种有效干扰方式。根据间歇采样转发干扰的基本原理, 对宽带成像雷达, 按照常规的均匀转发方式, 能够在高分辨距离像结果中叠加一串位置均匀分布的虚假散射点。虚假散射点序列的均匀分布特点不利于干扰信号的伪装。针对此问题, 以破坏虚假散射点序列均匀分布为目的, 在常规间歇采样转发干扰方法基础上, 提出间歇采样非均匀转发干扰方法, 并分析其干扰效果。最后通过仿真实验验证了所提出的方法能提高对宽带成像雷达的干扰效果。

关键词: 间歇采样转发干扰; 成像雷达; 非均匀转发

中图分类号: TN95 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2019)02-132-06

Jamming method to imaging radar using intermittent sampling un-uniformly repeater

GAO Lei¹, ZENG Yonghu¹, WANG Liandong¹, WANG Wei²

(1. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effect on Electronic and Information System, Luoyang 471003, China;

2. College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: ISRJ (interrupted-sampling repeater jamming) is an effective method to wideband imaging radar. According to the basic principle of ISRJ, when the jamming with conventional uniformly repeater is applied to wideband imaging radar, a string of uniformly spaced artificial scatters are overlain on the high resolution range profile. The artificial scatters' characteristic of being uniformly spaced goes against with the camouflage of jamming signal. In order to solve this problem, based on the conventional ISRJ, a new jamming method using interrupted-sampling un-uniformly repeater, in which the main purpose was broken the uniformly spaced of artificial scatters, was put forward, and the effect of the new jamming method was also analyzed. Finally, by means of simulation, it is found that the new jamming method can promote jamming effect to wideband imaging radar.

Keywords: interrupted-sampling repeater jamming; imaging radar; un-uniformly repeater

间歇采样转发干扰是一种针对宽带成像雷达的有效干扰方法, 该方法通过对雷达信号进行低速率的间歇采样处理, 巧妙利用对雷达信号的间歇性“欠采样”处理技术, 可以产生一串相干假目标^[1]。近年来, 在常规间歇采样转发干扰方式基础上, 出现了多种衍生的干扰方式, 如: 增加运动调制, 模拟运动状态的干扰^[2]; 在不同脉冲重复周期内, 选择不同的转发延时, 从而形成多个假目标^[3]。间歇采样转发干扰不仅能实现具有欺骗性的假目标, 甚至还能形成压制性干扰^[4]。

近年来的相关文献中分析指出: 间歇采样转发干扰方式对信号形式为线性调频信号的宽带雷达具有较好的干扰效果, 无论处理方式选择匹配滤波接收处理、“去斜”接收处理, 还是采取距离

多普勒处理方式, 都能在高分辨距离像 (High Resolution Range Profile, HRRP) 处理结果中形成一串相干假目标^[5-7], 达到对目标真实散射结构压制和欺骗的效果。从干扰效果上看, 间歇采样转发干扰在真实目标的 HRRP 中叠加了一串虚假散射点。这一串虚假散射点的幅度由中心向两侧逐渐下降, 而其位置具有均匀分布的特点^[8-9]。这一串位置均匀分布的虚假散射点使得其干扰的欺骗性不足: 真实目标上的强散射结构在距离维上的位置通常不会均匀分布, 幅度起伏亦没有特别规律。为了提高间歇采样转发干扰的欺骗性, 本文在分析其基本原理基础上, 指出导致欺骗性不足的原因, 进而提出间歇采样非均匀转发干扰方法, 并以逆合成孔径雷达 (Inverse Synthetic

* 收稿日期: 2018-01-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61571451)

作者简介: 高磊(1983—), 男, 安徽庐江人, 助理研究员, 博士, E-mail: ren_lgao@126.com

Aperture Radar, ISAR) 成像过程为干扰对象,对所提出的方法进行仿真验证。

1 间歇采样转发干扰原理与特点

1.1 间歇采样转发干扰信号模型

设理想间歇采样脉冲信号 $p_1(t)$ 为单位幅度的矩形包络脉冲串信号,表达式^[10]写为:

$$p_1(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) * \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_{s1}) \quad (1)$$

其中: $\text{rect}(t/\tau)$ 为矩形窗函数,满足

$$\text{rect}(t/\tau) = \begin{cases} 1, & |t/\tau| \leq 0.5 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

τ 为采样脉冲持续时间, T_{s1} 为间歇采样信号周期,“*”表示卷积处理, $\delta(\cdot)$ 为单位冲激函数。

设宽带雷达发射的线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号中心频率为 f_0 ,脉冲持续时间为 T_p ,线性调频率为 γ ,脉冲重复间隔为 T_{PRI} ,则发射信号可以写为:

$$s_0(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \times \exp\left[j2\pi\left(f_0\hat{t} + \frac{\gamma}{2}\hat{t}^2\right)\right] \quad (2)$$

其中, \hat{t} 是计量电波传播的快时间, $t = \hat{t} + t_m$ 为全时间,而 $t_m = mT_{PRI}$ 为计量脉冲发射时刻的慢时间。信号带宽 $B = \gamma T_p$ 。

考虑间歇采样转发干扰场景模型如图 1 所示,假设干扰机位于目标上随目标运动,坐标位置为 (x_j, y_j) ,目标相对于雷达运动等效的转动角速度为 ω (rad/s)。在目标小角度转动情况下,信号从雷达天线经干扰机天线返回的信号延时可近似为:

$$\tau_m = 2 \frac{R_0 + y_j + x_j \omega t_m}{c} \quad (3)$$

其中: R_0 表示雷达天线相位中心到目标的距离,即图 1 中矢量 \mathbf{R}_0 的模值; c 为真空中电磁波传播速度。

干扰机截获到雷达信号后,先进行信号采样,然后再转发。考虑干扰机系统自身存在固有延迟,假设为 τ_r ,则干扰信号相对于常规雷达回波的时间延迟可以写成 $\tau_s = \tau_r + \tau$,从而间歇采样转发形成的单位幅度转发干扰信号^[7]可以表示为:

$$\begin{aligned} s_{j1}(\hat{t}, t_m) &= p_1(t) \times s_0(\hat{t} - \tau_m - \tau_s, t_m) \\ &= \left[\text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \times \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_{s1}) \right] \times \\ &\quad \exp\left\{j2\pi\left[f_0(t - \tau_{\Delta}) + \frac{\gamma}{2}(\hat{t} - \tau_{\Delta})^2\right]\right\} \quad (4) \end{aligned}$$

其中, $\tau_{\Delta} = \tau_s + \tau_m$ 为干扰信号相对于发射信号的

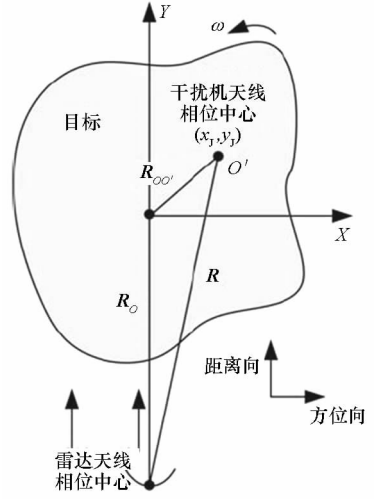


图 1 存在干扰情况下的 ISAR 成像观测模型

Fig. 1 Observation model for ISAR imaging when jamming exists

时间延迟,这个时间延迟由干扰机到雷达距离、间歇采样脉冲持续时间和干扰机系统延迟共同决定^[7]。

1.2 间歇采样转发干扰结果特点

在 ISAR 雷达中,对线性调频信号回波的常规处理方式主要有两种——匹配滤波处理或解线调频(Dechirping)处理^[5],这里考虑 Dechirping 处理方式。干扰信号与参考信号按照 Dechirping 方式完成接收处理后,忽略残余视频相位,其中频信号可以写为:

$$\begin{aligned} s_{j1}(\hat{t}, t_m) &= \left[\text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \times \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_{s1}) \right] \times \\ &\quad \exp[j2\pi\gamma(t_{\text{ref}} - \tau_{\Delta})\hat{t}] \times \exp[j2\pi f_0(t_{\text{ref}} - \tau_{\Delta})] \quad (5) \end{aligned}$$

其中, t_{ref} 表示参考时间。上述 Dechirping 处理结果经傅里叶变换处理得到 HRRP,可以用式(6)表示:

$$\begin{aligned} s_{jF}(f_r, t_m) &= F_i[s_{j1}(\hat{t}, t_m)] \\ &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \tau f_{s1} T_p \times \text{sinc}(n f_{s1} \tau) \times \\ &\quad \text{sinc}\{T_p[f_r - n f_{s1} - \gamma(\tau_{\Delta} - t_{\text{ref}})]\} \times \\ &\quad \exp[j2\pi f_0(t_{\text{ref}} - \tau_{\Delta})] \quad (6) \end{aligned}$$

其中, f_r 即快时间 \hat{t} 对应的频率, $f_{s1} = 1/T_{s1}$ 为间歇采样脉冲重复频率, $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$ 。观察式(5)可知,等号右侧的两个指数项与没有干扰情况下目标回波的 Dechirping 结果具有相似的形式(延时存在差异),差异主要体现在前面的求和项中。进一步回溯到式(1)可知,这个求和项对应了采样信号中的周期性冲激函数。在进行傅里叶变换之后,周期性冲激函数则对应了频域

的周期延拓,亦即式(6)中第二个 sinc 函数项中减去 nf_{s1} 项^[7]。

根据式(6)中第二个等号右侧部分的第二个 sinc 函数项的特点,间歇采样转发干扰会在 HRRP 中形成一串等间隔排列的虚假散射点,相邻虚假散射点的间隔由 f_{s1} 决定,而幅度则由式(6)中的两个 sinc 函数项共同决定,其中第一个 sinc 函数项占据了主导地位。

2 间歇采样转发干扰存在的问题及改进

2.1 常规间歇采样转发干扰方法存在的问题

根据式(6),干扰信号在 HRRP 中对应了一串均匀分布的虚假散射点,这些虚假散射点的位置由式(7)决定。

$$f_{rj} = nf_{s1} + \gamma(\tau_{\Delta j} - t_{ref}) \quad (7)$$

式中: $\tau_{\Delta j} = \tau_s + \tau_m = \tau_r + \tau + \tau_m$,这里 τ_r 为干扰机固有延迟,为常量; τ 为干扰信号采样脉冲持续时间,为常量; τ_m 是由于干扰机相对于雷达的直线距离在雷达波束上投影长度决定的延时常量,在较短的观测时间内,可以认为这个值是常量; f_{s1} 对应间歇采样周期,在每次干扰过程中,可视为常数。因此,在单帧回波的 HRRP 中,虚假散射点位置呈现出均匀分布的特点。

间歇采样转发干扰产生的虚假散射点序列在位置分布的特点使得其人造痕迹非常显著。下面通过公式推导说明这点。

对式(6)刻画的 HRRP,以某个时刻 t_m 为例,设其包络记为 $\bar{s}_{jF}(f_r)$,下面考虑其离散化。设 f_r 取值范围为 $-f_M \sim f_M$,则式(6)求和符号中, n 最大值为 $n_{max} = [f_M - \gamma(\tau_{\Delta j} - t_{ref})]/f_{s1}$,最小值为 $n_{min} = -[f_M + \gamma(\tau_{\Delta j} - t_{ref})]/f_{s1}$ 。将 $-f_M \sim f_M$ 范围内频率离散化得到 L 个点,则频率离散间隔为 $\Delta f = 2f_M/(L-1)$,从而 $\bar{s}_{jF}(f_r)$ 离散化结果 $\bar{s}_{jF}(l)$ 可以写为:

$$\bar{s}_{jF}(l) = \sum_{n=n_{min}}^{n_{max}} |a(n) \times \text{sinc}[T_p(-f_M + l\Delta f - f_{rj})]| \quad (8)$$

其中, $l=0,1,\dots,L-1$, f_{rj} 与 n 的关系由式(7)刻画, $a(n) = \tau f_{s1} T_p \times \text{sinc}(nf_{s1}\tau) \times \exp[j2\pi f_0(t_{ref} - \tau_{\Delta j})]$,相应地, $\bar{s}_{jF}(l)$ 自相关序列向量为:

$$\text{corr}(m) = \sum_{l=0}^{L-1-m} \bar{s}_{jF}(l)\bar{s}_{jF}(l+m) \quad (9)$$

由式(8)特点可知,只要有 $m\Delta f = nf_{s1}$ (m, n 为整数), $\bar{s}_{jF}(l)$ 与 $\bar{s}_{jF}(l+m)$ 上虚假散射点位置存在重合,从而 $\text{corr}(m)$ 将会产生一个局部峰值,

考虑到 n 的取值范围,故 $\text{corr}(m)$ 序列对应了多个局部峰值,且峰值之间的位置均匀分布。这一现象在目标回波 HRRP 包络的自相关序列中一般不会出现,从而使得间歇采样转发干扰形成的虚假散射点序列欺骗性不够(上述现象将在本文后续给出的仿真实验得到验证),难以达到预期效果。

2.2 间歇采样非均匀转发干扰方法

通过前述式(8)、式(9)分析可知,干扰信号 HRRP 包络自相关序列中多个局部峰值实际上是由虚假散射点序列位置均匀分布产生的,而导致这一现象的本质则来源于式(4)中的周期性冲激函数序列。因此,为了破坏虚假散射点序列位置的均匀分布特性,一种直观的解决方法是破坏冲激函数序列的周期性。

冲激函数序列的周期性源于间歇采样脉冲信号的矩形包络脉冲串形式,为破坏其周期性,一种简单的考虑是将间歇采样结果进行非均匀转发:随机选取部分子脉冲结果予以转发,而不是全部转发。这样在雷达接收机收到的干扰信号中,干扰信号呈现为时间上不均匀的脉冲串,然后在按照匹配滤波或 Dechirping 处理得到的 HRRP 中,虚假散射点序列不再呈现为均匀分布。

为了保证所选择脉冲串的随机性,可以考虑预先生成随机 0/1 序列(贝努利序列),根据序列中“1”的位置,确定转发的子脉冲。在具体应用时,有两种应用方式:第一种是固定一种子脉冲随机选择方式,应用到全部宽带雷达信号的转发中;第二种是预置一定数量的随机选择方式,循环应用,每帧宽带雷达信号选择不同的随机选择方式。在后面将通过仿真说明两种应用方式的优劣。

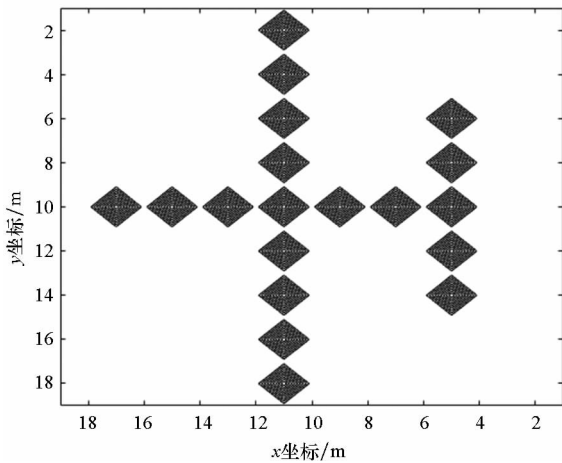
需要说明的是,文献[3]提出了间歇采样非均匀重复转发干扰方式,其实现思路是对宽带雷达的每个脉冲,起始转发的延时不同,但在脉冲内部还是均匀转发的,即脉间不均匀。而本文所提出的非均匀转发是在脉冲内部不均匀选择子脉冲转发,脉间可以相同,也可以不同。

3 仿真分析

3.1 仿真场景与干扰参数设置

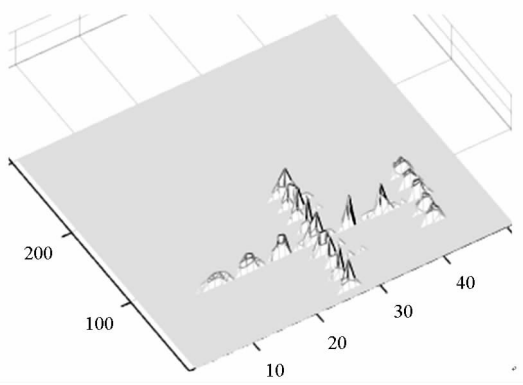
目标模型如图 2 所示,共由 19 个散射点组成,散射点分布俯视图如图 2(a)所示。根据该图可获知全部散射点在目标坐标系下的坐标信

息。干扰机放置在目标模型的水平对称轴上,左起第5个散射点对应位置。在雷达坐标系下,雷达位于坐标系原点,目标坐标为(0 m,8000 m),目标坐标系和雷达坐标系两个坐标轴方向平行(y 轴方向为雷达波束方向),目标沿 x 轴方向运动,运动速度设为 $v_x = 230$ m/s, $v_y = 0$ m/s。具体的雷达信号与干扰信号参数如表1、表2所示。图2(b)是无干扰情况下的目标ISAR像(三维视图,下同)。按照表1的参数,在积累时间内,有1281帧回波数据,在实际处理时,在慢时间域进行了5倍抽取,最终用于成像处理的回波数据为257帧。



(a) 散射点模型

(a) Scatter model



(b) 无干扰情况下成像结果

(b) Imaging result when no jamming exists

图2 目标散射点模型与无干扰情况下ISAR成像结果

Fig.2 Scatter model of target and its ISAR imaging result when no jamming exists

表1 雷达工作信号参数

Tab.1 Parameters for radar signal

载频	带宽	脉宽	脉冲重频	积累时间
10 GHz	1 GHz	10 μ s	500 Hz	2.56 s

表2 干扰信号参数

Tab.2 Parameters for jamming signal

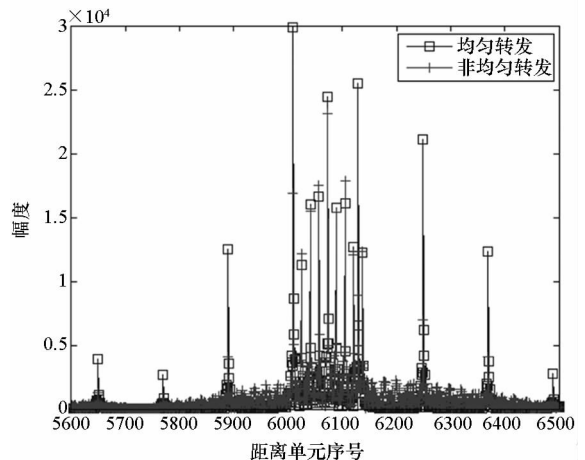
脉冲持续时间	间歇采样信号周期	间歇采样占空比	间歇采样信号幅度	随机抽取子串比例
0.03 μ s	0.1 μ s	0.3	7	30%

在上述雷达信号参数和干扰参数设置下,开展存在干扰情况下的ISAR成像仿真。这里应用的成像方法为距离-多普勒算法,其中包络对齐方法选择全局相关法^[11],初相校正方法选择多散射点中心法^[5]。干扰拟采取两类形式——常规间歇采样转发干扰、间歇采样非均匀转发干扰,而在间歇采样非均匀转发干扰中,对于非均匀转发子脉冲串所使用的随机序列,又考虑两种选择方式。方式1:各脉冲间,转发时应用的随机序列相同。方式2:各脉冲间,转发时应用的随机序列不同。

3.2 不同干扰方法结果对比

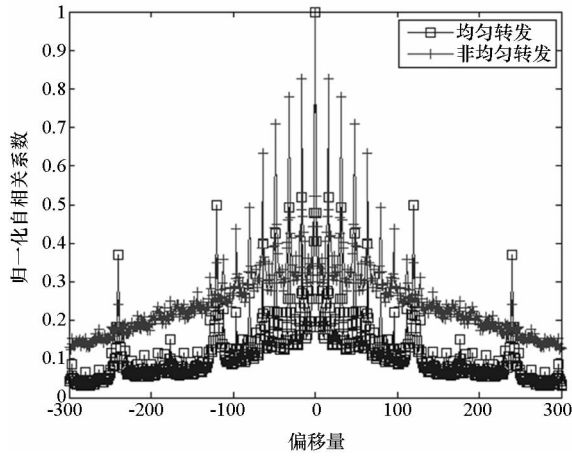
首先给出常规间歇采样转发干扰情况(均匀转发)与间歇采样非均匀转发干扰情况下HRRP数据的对比情况。这里分别给出HRRP包络对比结果和自相关系数对比结果。从HRRP包络对比(见图3(a))上可以看出,非均匀转发之后,强散射点周围的虚假散射点得到减弱。通过自相关系数对比(见图3(b))可以清晰地看出,均匀转发时,自相关系数出现显著的周期性极大值序列(位置均匀分布,幅度减弱),而非均匀转发时,这一现象被显著弱化。

进一步给出均匀转发干扰和非均匀转发干扰情况下ISAR成像结果对比,如图4所示。图4(a)和图4(b)给出了两种非均匀转发干扰情况下的成像结果,分别对应单一随机序列、多个随



(a) HRRP 包络

(a) Envelope of HRRP



(b) HRRP 包络自相关系数

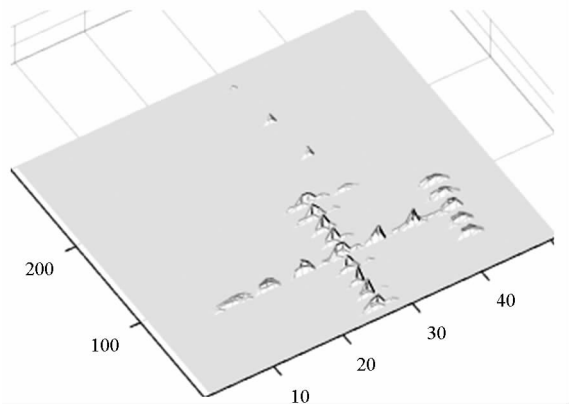
(b) Autocorrelation coefficient for envelope of HRRP

图 3 不同转发方式下 HRRP 结果对比

Fig. 3 Comparison of HRRP under different repeater manner

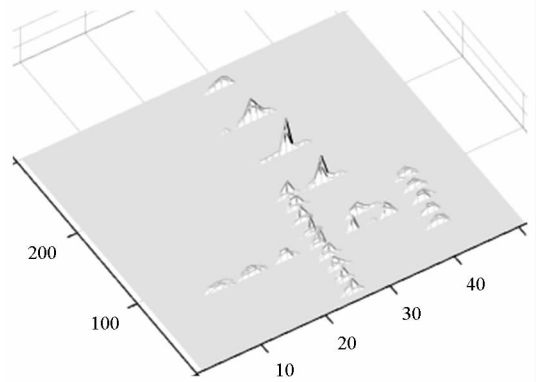
机序列的情况。图 4(c) 给出了均匀转发干扰情况下的成像结果。从成像结果可以看出,非均匀转发干扰方式下成像结果在距离维上出现较为连续的一段条带,尤其是在应用单一随机序列的情况(见图 4(a) 上半部分)下,更容易被认为是目标上散射的一部分。而在应用均匀转发干扰时,在距离维上出现的是离散的几个条带,人造痕迹相对明显一点。

进一步观察图 4(a) 和图 4(b) 结果,可以看出,应用单一随机序列来控制非均匀转发的效果好于应用多个随机序列。进一步结合 ISAR 成像处理过程可知,如果应用多个随机序列,则使得相邻回波 HRRP 中干扰信号差异性较大,不利于干扰信号分量在成像处理中的包络对齐,从而弱化了干扰分量的聚焦效果,因此从这个角度看,建议应用单一随机序列来控制非均匀转发干扰。



(b) 非均匀转发方式 2

(b) Un-uniformly repeater with manner 2



(c) 均匀转发方式

(c) Uniformly repeater

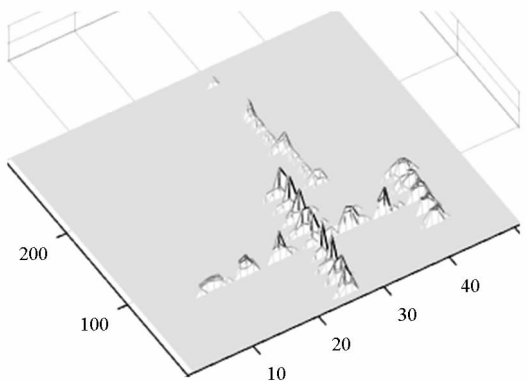
图 4 不同转发方式下 ISAR 成像结果对比

Fig. 4 Comparison of ISAR image under different repeater manner

4 结论

间歇采样转发干扰能够对宽带成像雷达形成有效干扰,并在 HRRP 上形成一串位置均匀分布的虚假散射点。这一特点使得常规的间歇采样转发干扰的欺骗性不强。针对此问题,本文在分析虚假散射点位置均匀分布的原因基础上,针对性地提出了间歇采样非均匀转发干扰方法。最后,通过仿真验证,指出了间歇采样非均匀转发干扰方法的欺骗效果强于常规的间歇采样均匀转发干扰方法。

本文方法的应用领域:在前述分析中,主要以 ISAR 观测场景为例展开,但后续针对常规间歇采样转发干扰特点的分析以及本文所提出的改进方法均与 ISAR 观测场景特点无关联。此外,ISAR、SAR 两种成像体制原理上是相同的,因此,本文的方法也可以适用于对 SAR 成像的干扰。



(a) 非均匀转发方式 1

(a) Un-uniformly repeater with manner 1

参考文献 (References)

- [1] 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 E 辑, 2006, 36(8): 891-901.
WANG Xuesong, LIU Jiancheng, ZHANG Wenming, et al. Mathematic principles of interrupted-sampling repeater jamming[J]. Science in China(Series E), 2006, 36(8): 891-901. (in Chinese)
- [2] 周阳, 毕大平, 沈爱国, 等. 对合成孔径雷达的运动调制间歇采样干扰方法[J]. 探测与控制学报, 2017, 39(3): 112-117.
ZHOU Yang, BI Daping, SHEN Aiguo, et al. Motion modulation intermittent sampling repeater jamming against SAR[J]. Journal of Detection & Control, 2017, 39(3): 112-117. (in Chinese)
- [3] 张养瑞, 李云杰, 李曼玲, 等. 间歇采样非均匀重复转发实现多假目标压制干扰[J]. 电子学报, 2016, 44(1): 46-53.
ZHANG Yangrui, LI Yunjie, LI Manling, et al. Suppress jamming technique of multiple false targets on interrupted-sampling and non-uniform periodic repeater [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(1): 46-53. (in Chinese)
- [4] Zhou C, Liu Q H, Chen X L. Parameter estimation and suppression for DRFM-based interrupted sampling repeater jammer[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 12(1): 56-63.
- [5] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 19-29.
BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. Radar imaging technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 19-29. (in Chinese)
- [6] Feng D J, Xu L T, Pan X Y, et al. Jamming wideband radar using interrupted-sampling repeater [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(3): 1141-1154.
- [7] 高磊, 曾勇虎, 汪连栋, 等. 宽带成像雷达间歇采样转发干扰应用策略[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(5): 90-95.
GAO Lei, ZENG Yonghu, WANG Liandong, et al. Application strategy for intermittent sampling repeater jamming to wideband imaging radar[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(5): 90-95. (in Chinese)
- [8] 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 Dejun, TAO Huamin, YANG Yong, et al. Interrupted-sampling repeater jamming to de-chirp radar[J]. Science in China; Information Sciences, 2012, 42(2): 186-195. (in Chinese)
- [9] 潘小义, 王伟, 冯德军, 等. 对解线频调 ISAR 的间歇采样转发干扰[J]. 宇航学报, 2013, 34(9): 1274-1280.
PAN Xiaoyi, WANG Wei, FENG Dejun, et al. Jamming dechirping ISAR based on intermittent sampling repeater[J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(9): 1274-1280. (in Chinese)
- [10] 潘小义. 基于目标散射及微动特性调制的 ISAR 干扰方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2014.
PAN Xiaoyi. Study on ISAR jamming techniques based on scattering and micro-motion characteristics modulation of targets [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [11] 许人灿, 杜琳琳, 陈曾平. 一种改进的空间目标高速运动补偿方法[J]. 宇航学报, 2010, 31(4): 1118-1124.
XU Rencan, DU Linlin, CHEN Zengping. An improved compensation method for high velocity of space targets[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(4): 1118-1124. (in Chinese)