

基于间歇采样转发干扰的 ISAR 群目标生成方法*

徐乐涛^{1,2}, 冯德军^{1,2}, 张文明², 王雪松^{1,2}

(1. 国防科技大学 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;
2. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要:基于间歇采样转发干扰理论,提出了一种 ISAR 二维群目标生成方法。采用伴飞式干扰机,对所掩护的目标回波信号进行间歇采样转发,在 ISAR 上形成逼真的虚假二维群目标图像;通过调整干扰机和目标的空间位置关系,生成二维假目标序列,并能模拟目标的动态姿态变化。在介绍了间歇采样转发干扰的基本原理后,阐述了伴飞式干扰原理,然后从理论上推导了伴飞式干扰机的功率和空间位置要求,接下来着重分析了二维群目标生成的理论原因,指出了影响二维群目标分布的关键因素和群目标的姿态角变化规律,最后进行了仿真验证,结果表明了该方法的有效性。研究成果对于 ISAR 干扰机的设计和工程应用具有指导意义。

关键词:间歇采样转发;二维群目标;伴飞式干扰机;姿态角;逆合成孔径雷达

中图分类号:TN958 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)05-0140-06

Group targets generation against ISAR based on intermittent-sampling repeater jamming (ISRJ)

XU Letao^{1,2}, FENG Dejun^{1,2}, ZHANG Wenming², WANG Xuesong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environmental Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A novel generation method of 2-D ISAR group targets is presented based on Intermittent-Sampling Repeater Jamming (ISRJ).

Escort free-flight jammer was used to intermittently sample and repeater target echoes, which can generate vivid 2-D group targets in ISAR. By adjusting jammer and target's relative space position, 2-D group targets are able to simulate target's attitude angle dynamically. After the theory of ISRJ was expounded, the principle of escort free-flight jamming was introduced. A theoretical study was carried out to determine the requirement for power and position. Then the theoretical reason of 2-D group targets was emphatically analyzed. The key factor of false targets distribution and attitude angle was explored. Finally, the simulation demonstrates that the above method is effective. The results obtained from this research will help to provide better guidance for the design and engineering application of ISAR jammer.

Key words: intermittent-sampling repeater jamming; 2-D group targets; escort free-flight jammer; attitude angle; ISAR

逆合成孔径雷达 (ISAR) 通过纵向和横向的二维压缩实现成像,可以获得目标散射中心的二维分布,因而能观测到目标结构上的微小细节,为真假目标鉴别提供丰富的信息^[1]。这使得 ISAR 成为目标识别的重要手段,对导弹、飞机类目标的突防构成了重大的威胁。如何对 ISAR 实施有效干扰,破坏其目标识别能力,是当前雷达对抗领域研究的热点^[2-3]。

ISAR 通过二维压缩,可以获得很高的处理增益,一般压制式干扰很难对其进行有效覆盖,不适宜伴飞式干扰机采用,因此对其多采用欺骗式干

扰^[4-6]。目前针对 ISAR 的有源欺骗干扰主要是通过侦察系统获得敌方 ISAR 发射信号和关键参数,对截获的 ISAR 信号进行幅度调制和相位调制后再发射出去。文献[7]最早提出了基于数字图像合成 (DIS: Digital Image Synthesis) 技术的 ISAR 干扰假目标欺骗方法,利用 DIS 技术合成假目标图像对 ISAR 形成欺骗干扰,并完成了数字图像合成器芯片的设计和硬件实现。文献[8-9]给出了不同的调制系数以实现假目标干扰。但是,上述干扰方法通常只能形成单个的 ISAR 假目标,生成群目标需要付出很高的成本和

* 收稿日期:2013-01-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61072119);国防科技大学优秀研究生创新资助(S120403)

作者简介:徐乐涛(1987-),男,山东烟台人,博士研究生,E-mail:xuletaowin@126.com;

王雪松(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:wxs1019@vip.sina.com

时间代价;此外,除了需要利用侦察设备精确测知 ISAR 发射信号的参数,还要精确测得真实目标和干扰机的相对运动信息,这在实际中是很难实现的。

间歇采样转发干扰是一种新型干扰方法^[10],其核心思想和价值在于巧妙地利用对雷达信号的间歇性“欠采样”处理技术,通过转发部分雷达信号而实现相干干扰,其显著优点是对干扰机的工程化要求大为降低,而且响应速度快,生成假目标逼真且灵活可控。但目前采用间歇采样转发对 ISAR 干扰的研究的文献还尚未见诸报道。本文针对现有 ISAR 欺骗干扰的缺点,提出了一种基于间歇采样转发的逼真二维 ISAR 群目标生成方法。在对间歇采样转发原理进行简介后,阐述了伴飞式转发干扰方法,推导了对干扰机的功率和空间位置要求,并分析了间歇采样转发形成二维群目标的理论原因。理论分析和仿真结果表明,该方法对干扰机功率要求不高,通过调整转发周期和占空比,可以生成结构上和真目标相同的 ISAR 群假目标,且群假目标姿态变化可以动态调制。

1 伴飞式 ISAR 群目标生成方法

1.1 伴飞式干扰的基本原理

对 ISAR 的伴飞式干扰原理如图 1 所示,在空中目标飞行过程中,干扰机始终位于地面雷达与目标之间。

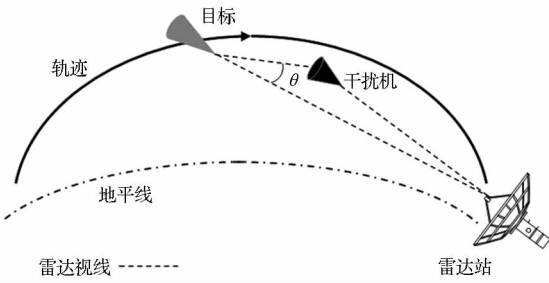


图 1 伴飞式干扰原理示意图

Fig. 1 The scene of ISAR escort jamming

干扰机安装两副天线:一副放置于干扰机尾部,并指向目标,另一副置于干扰机头部,保持指向地面防御雷达。当头部天线截获到窄带信号时,可判断雷达正处在搜索、跟踪状态,干扰机对头部天线接收到的雷达发射信号进行调制转发,形成传统意义上的距离向多假目标^[10],进而破坏地面雷达对目标的搜索跟踪。当头部天线截获到大时宽带宽信号时,可判断雷达正处在 ISAR 成像的工作状态,尾部天线开始接收目标反射的包

含有方位向信息的雷达回波信号并存储在数字射频存储器(DRFM)中,经处理后从头部天线转发。可以看出,这种干扰方法的实施不依赖于对地面雷达的参数侦察,并且由于干扰机转发了真实目标的雷达回波,因此产生的假目标姿态变化可与真实目标保持一致。

1.2 ISAR 群目标生成及其特性分析

从图 1 可以看出,如果采用传统的转发式干扰即接收到全部时长的雷达信号后再转发,由于转发的信号包含有目标的方位向信息,虽然可以在雷达处产生逼真的二维假目标,但同时也存在着对天线收发隔离度要求高、产生的假目标滞后于真实目标等缺点。间歇采样转发干扰作为一种新型的转发式干扰,通过对接收的雷达信号进行间歇性“欠采样”处理,并巧妙利用脉压雷达的匹配滤波特性,可产生多假目标的干扰效果,部分假目标还可超前于真实目标出现^[10]。本文采用间歇采样转发干扰实现了 ISAR 群目标的生成,下面详细分析其原理。

对于线性调频信号,间歇采样脉宽设为 τ ,采样周期为 T_s ,干扰机延迟时间为 τ_d ,以雷达发射信号 T_l 为起始点, K 为调频斜率,则采样转发信号可以表示为^[11]

$$x_s(t) = \sum_{n=1}^N \text{rect}\left(\frac{t - T_l - \tau_d - (n-1)T_s}{\tau}\right) \cdot \exp\left(2j\pi\left(f_0(t - T_l - \tau_d) + \frac{1}{2}K(t - T_l - \tau_d)^2\right)\right) \quad (1)$$

设混频参考延时为 T_l ,则参考信号为

$$x_r(t) = \text{rect}\left(\frac{t - T_l}{T}\right) \cdot \exp\left(2j\pi\left(f_0(t - T_l) + \frac{1}{2}K(t - T_l)^2\right)\right) \quad (2)$$

式(2)参考信号与式(1)表示的转发信号进行混频处理,输出为

$$x_f(t) = \sum_{n=1}^N \text{rect}\left(\frac{t - T_l - \tau_d - (n-1)T_s}{\tau}\right) \cdot \exp(2j\pi[Kt(T_l - T_l - \tau_d)]) \cdot \exp(j\pi K((T_l + \tau_d)^2 - T_l^2)) \cdot \exp(2j\pi f_0(T_l - T_l - \tau_d)) \quad (3)$$

补偿视频相位残余项后得到

$$x(t) = \sum_{n=1}^N \text{rect}\left(\frac{t - T_l - \tau_d - (n-1)T_s}{\tau}\right) \cdot \exp(2j\pi Kt(T_l - T_l - \tau_d)) \cdot \exp(2j\pi f_0(T_l - T_l - \tau_d)) \quad (4)$$

对式(4)作傅里叶变换,得到信号的频谱即

一维距离像为

$$X(f) = \tau \frac{T}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{Sa}(n\pi f_s \tau) \cdot \text{Sa}(\pi T(f - f_0 - nf_s)) \exp(2j\pi f_0(T_L - T_i - \tau_d)) \quad (5)$$

其中

$$f_0 = k(T_L - T_i - \tau_m) \quad (6)$$

$$\tau_m = \frac{2R}{c} = \frac{2(R_0 + x_m)}{c} \quad (7)$$

$$\text{Sa}(n\pi f_s) = \text{Sa}(n\pi\tau/T_s) = \text{Sa}(n\pi\eta) \quad (8)$$

R_0 是雷达距离目标上固定散射点的距离, x_m 为其他散射点相对固定散射点的横向距离, η 是采样占空比。利用互相关法实现包络对齐以消除回波包络在距离和方位向存在的耦合^[12], 得到

$$X'(f) = \tau \frac{T}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{Sa}(n\pi\eta) \cdot \text{Sa}(\pi T(f - f'_0 - nf_s)) \exp(2j\pi f_0(T_L - T_i - \tau_d)) \quad (9)$$

其中 f'_0 与 x_m 无关。式(9)的指数项是发射波经过不同方位向散射点反射形成的相位, 是 ISAR 方位向成像的基础。可见, 经过 FFT 后相位未受到影响, 说明一维距离像的每一阶假目标都包含有横向分辨所需的相位变化, 因此, 在每个一维距离像的假目标处经过 ISAR 处理均可以形成二维假目标。

从式(9)还可以看出, 采样转发信号去斜处理后的频谱为多个辛克函数的加权和, 辛克函数频谱间隔取决于间歇采样转发频率 f_s , 其加权幅度则取决于采样频率 f_s 、采样脉冲的宽度 τ 、转发频谱的阶数。实际上, 这多个辛克函数就构成了多阶假目标, 其中 0 阶假目标幅度为 $\tau T/T_s$, 位于频率 f'_0 处, 其余高阶假目标在 0 阶假目标的周围依次排列, 相邻假目标峰值点间的距离为 f_s , 其幅度受到辛克函数的加权。频率差 f_s 对应的距离差^[11]

$$\Delta r = \frac{cf_s}{2K} \quad (10)$$

2 伴飞式干扰关键参数分析

2.1 对伴飞式干扰的功率需求分析

干扰机接收并转发目标回波信号, 相当于将天线接收处的回波信号重新辐射到整个空间, 造成能量分散, 因此有必要分析干扰回波功率与目标回波功率之间的关系, 这是后文分析干扰机距离向位置的基础, 更是干扰能否有效实施的关键。雷达接收目标回波功率为

$$P_r = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (11)$$

其中, P_t 为雷达发射峰值功率, G 为雷达天线增益, σ 为目标 RCS, λ 为雷达发射信号波长, R 为目标与雷达之间距离。干扰机尾部天线接收目标回波信号功率为

$$P_{j-r} = \frac{P_t G G_w \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^2 R_w^2} \quad (12)$$

其中, G_w 为尾部天线增益, R_w 为干扰机与目标距离。雷达接收干扰信号功率为

$$P_j = \frac{P_{j-r} G_t G \lambda^2}{(4\pi)^2 R_t^2} \quad (13)$$

其中, R_t 为干扰机与地面雷达距离, G_t 为头部天线增益。地面雷达处干信比为

$$ISR = \frac{P_j}{P_r} = \frac{G_w G_t \lambda^2 R^2}{(4\pi)^2 R_w^2 R_t^2} \quad (14)$$

联立式(11)~(14), 得到干扰机发射功率表达式为

$$P_{j-s} = P_{j-r} G_t = \frac{P_t G \sigma R_t^2}{4\pi R^4} \cdot ISR \quad (15)$$

设雷达发射功率 P_t 为 810kW, 天线增益为 60dB, 目标 RCS 为 0.4m², 目标距离雷达 $R = 1000$ km, 给出不同干信比 ISR 要求下干扰机发射功率与干扰机位置关系如图 2 所示。

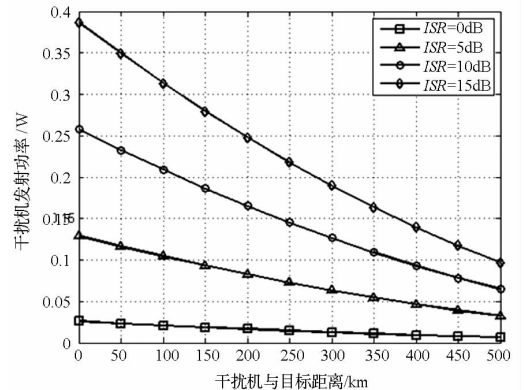


图 2 干扰机发射功率与干扰机位置关系曲线
Fig. 2 Required emitting power for the jammer

从图 2 可以看出, 干扰机发射功率随着干扰机与目标距离增加而逐渐减小。当 ISR 要求为 15dB, 所需干扰机最大功率仅有 0.4W, 对干扰机功率要求不高。

2.2 对伴飞式干扰的空间位置需求分析

干扰机位置分析的参照点设定在目标上, 分为距离向和方位向两方面: 距离向上, 干扰机位置主要受功率限制。根据 2.1 节结论, 干扰功率要求不高, 因此, 干扰机在距离向布置位置比较灵活。下面分析方位向, 为有效提高干扰机功率利用效率, 伴飞式干扰机应与目标同时位于雷达主瓣之

内。设 GBR 波束宽度为 0.14° , 目标与雷达距离 1000km , 求得干扰机横向距离范围如表 1 所示。

表 1 干扰机与目标横向距离

Tab. 1 Cross range between the jammer and target

纵向距离 /km	最大横向距离 /km
0	2.44
100	2.20
200	1.95
300	1.71
400	1.47
500	1.22

实际中, 干扰机很难一直保持在雷达和目标的连线上。此时, 雷达、目标和干扰机等效于双站 ISAR: 雷达为 ISAR 发射站, 干扰机为 ISAR 接收站, 采用干扰机接收的信号进行 ISAR 成像处理, 其结果等效为将单站 ISAR 布置在双基地夹角 (图 1 中的 θ 角) 平分线处的成像结果, 干扰机转发信号产生的假目标相对于真实目标的 ISAR 像, 存在一定的角度倾斜, 倾斜角为 θ 的一半^[13]。横向分辨率也会发生变化, 相对横向分辨率 (双站模式分辨力 / 单站模式分辨力) $k_{bistatic}$ 为

$$k_{bistatic} = \frac{1}{\cos(\theta/2)} \quad (16)$$

由于干扰机前向部署, 为保证尾部天线对目标的跟踪, θ 一般在 $0 \sim 60^\circ$, 对应的 k 值如图 3 所示。

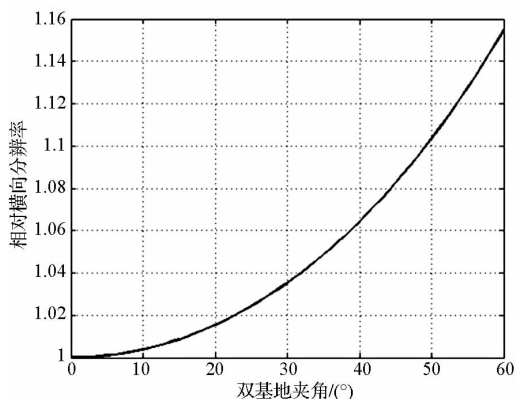


图 3 相对横向分辨率与双基地夹角的关系

Fig. 3 Relative cross resolution

由图 3 可见, 当 θ 在 $0 \sim 60^\circ$ 内变化时, 相对横向分辨率范围在 1 附近, 这说明即使目标、干扰机和雷达不在一条直线上, 转发干扰信号也对假目标横向分辨率影响不大。但是, 为避免假目标与真实目标产生角度倾斜, θ 应尽可能小, 这意味着干扰机要尽可能布置在雷达与目标的连线附近。

目标在飞行过程中, 会根据需要不断调整自身姿态角, 在 ISAR 处所成的二维像也会相应发生变化。由于干扰机姿态保持稳定, 其接收到的

雷达回波中姿态角信息完全来自于目标, 因而其转发干扰信号所形成假目标的姿态角 θ_{False} 与真实目标姿态角 θ_{Real} 关系如下。

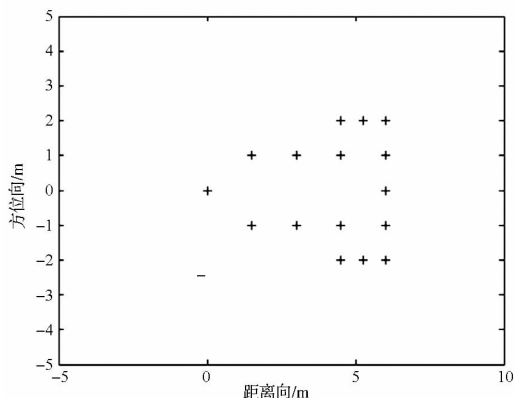
$$\theta_{False} = \theta_{Real} + \theta/2 \quad (17)$$

其中, $\theta/2$ 是当目标、干扰机和雷达不在一条直线上时夹角带来的角度变化。真实目标与假目标的姿态角变化量关系如下

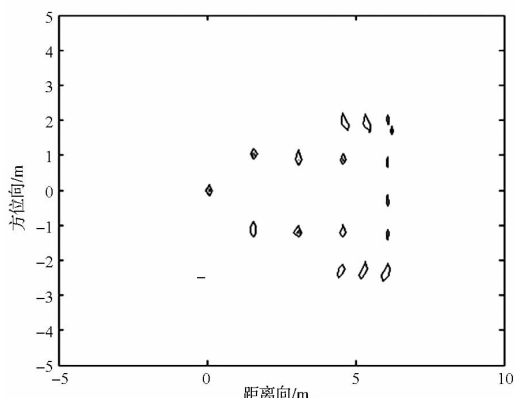
$$d\theta_{False} = d\theta_{Real} \quad (18)$$

3 仿真分析

以前述雷达为例, 发射信号波长 0.03m , 线性调频信号带宽 1GHz , 脉宽 $128\mu\text{s}$, 载频 10GHz , PRF 为 100Hz , 一个相干处理时间包括 128 个脉冲, 相对转角为 5° , 由此可知目标径向分辨率和横向分辨率分别为 0.15m 和 0.17m 。仿真目标结构如图 4(a) 所示, 整个目标由 16 个散射点组



(a) 仿真目标散射点结构



(b) 仿真目标 ISAR 像

图 4 仿真目标散射点结构和 ISAR 像

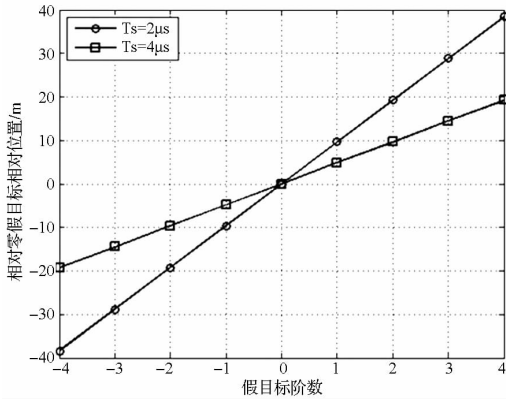
Fig. 4 The configuration and ISAR image of the simulated target

成, 各散射点 RCS 均为 0.4m^2 , 飞行时 X 轴与速度方向一致。假定姿态角为 0° 时, X 轴与雷达视线在一条直线上。ISAR 二维成像处理采用 RD 算法。根据上述参数生成回波信号, 对回波信号进行 STRETCH 处理。

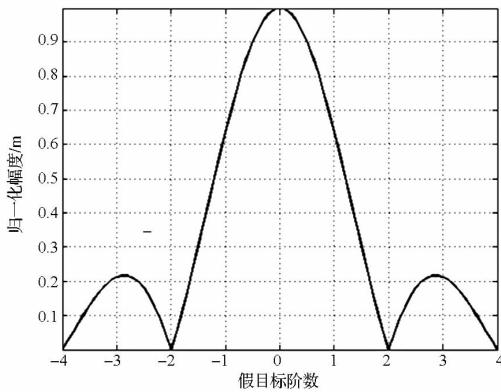
距离维成像采用 FFT 算法, 对经 STRETCH

处理后的宽带回波进行傅里叶变换,获得目标的距离像,然后采用包络对齐法进行距离像对齐,采用特显点聚焦法进行相位校准,获得无干扰条件下成像结果如图 4(b) 所示。

下面首先分析间歇采样周期对群目标分布和幅度的影响。假设间歇采样占空比为 50%,根据式(9),计算得出不同间歇采样周期各阶假目标相对位置,如图 5(a) 所示,各阶假目标幅度如图 5(b) 所示(图中假目标幅度以峰值假目标幅度为基准进行了归一化)。



(a) 不同采样周期各阶假目标相对位置



(b) 各阶假目标归一化幅度

图 5 不同采样周期各阶假目标位置与幅度

Fig. 5 The distribution and amplitude of false targets

从图 5(a) 中可以看出,间歇采样周期越小,各阶假目标之间相对距离越大;从另一个角度可以认为,采样周期越小,意味着采样频率越大,各阶假目标的多普勒频移越大,因而去斜处理后间距也越大。由图 5(b) 可以看出,各阶假目标幅度受到 sinc 函数调制,其中 $\pm 2, \pm 4$ 阶假目标幅度为 0。这是因为根据式(8),采样占空比 50% 情况下,偶数阶假目标幅度为 0。图 6 画出了不同间歇采样周期二维群目标干扰效果,可以看出,间歇采样转发实现了二维多假目标欺骗干扰,其幅度和空间分布与上述分析一致。

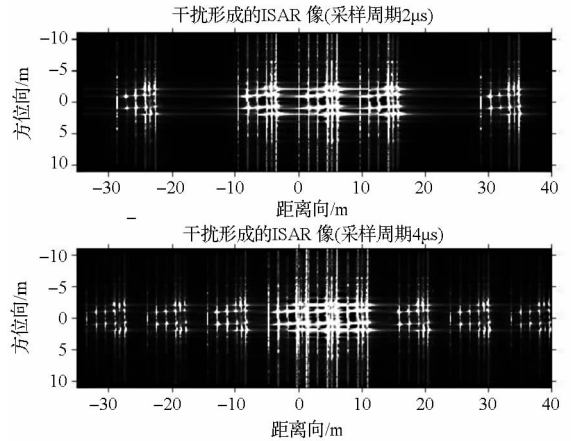


图 6 不同采样周期 ISAR 干扰效果对比

Fig. 6 Jamming effect under different sampling cycle

接下来分析采样占空比对群目标的影响。由式(8)可以看出,当采样周期固定时,假目标之间的相对距离保持不变,说明采样占空比不影响假目标的空间分布。下面分析其对假目标幅度的影响。设定采样周期为 $2\mu s$,表 2 给出了采样占空比为 10%、30% 和 50% 对应的各阶假目标的幅度(按照 50% 占空比 0 阶假目标幅度为基准进行了归一化)。

表 2 不同占空比各阶群目标归一化幅度

Tab. 2 The normalized amplitude of false targets under different sampling duty ratio

阶数 N	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
10%	0.1514	0.1717	0.1871	0.1967	0.2000	0.1967	0.1871	0.1717	0.1514
30%	0.0935	0.0656	0.3027	0.5150	0.6000	0.5150	0.3027	0.0656	0.0935
50%	0.0000	0.2122	0.0000	0.6366	1.0000	0.6366	0.0000	0.2122	0.0000

从表 2 可以看出,占空比较低时,高阶假目标幅度衰减缓慢,各阶假目标幅度较低;随着占空比增加,高阶假目标幅度迅速衰减,能量向低阶假目标集中。这说明,如果优先考虑生成群目标的数量,则采样占空比应适当减小,并予以能量补偿,以增加各阶假目标的幅度;如果优先考虑假目标

的幅度,则采样占空比可适当增加。

最后,来分析假目标姿态角的变化规律。设采样周期为 $2\mu s$,采样占空比为 50%,目标姿态角分别为 $0^\circ, 30^\circ$ 和 60° , θ 分别设定为 0° 和 30° 。仿真结果如图 7 所示,第一列代表不同姿态角目标 ISAR 像,第二列代表 $\theta = 0^\circ$ 群目标 ISAR 像,第三

列代表 $\theta = 30^\circ$ 群目标 ISAR 像。

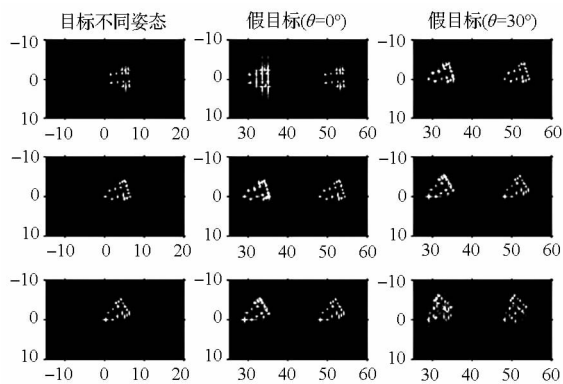


图7 不同姿态角目标对应二维群目标干扰

Fig.7 Jamming effect at different attitude angles

从图7可以看出,随着真实目标姿态角变化,生成二维群目标的姿态角随之发生改变且变化量相同,与式(18)的分析一致。说明本文提出的伴飞式干扰方法克服了传统转发干扰生成的假目标姿态角不变的缺点,使假目标更加逼真,不易被 ISAR 识别。当伴飞式干扰机偏离雷达-目标连线,会使群目标相比真实目标发生角度偏差,偏移角等于等效 θ 的一半,验证了式(17)的结论。在实际应用中,可以灵活设置干扰参数,使生成的假目标群呈现动态的飞行姿态变化,这样更接近于真实目标的运动特性。

4 结束语

通过本文研究可以看出,采用伴飞式干扰机,利用间歇采样转发干扰原理,可以生成 ISAR 二维群假目标,这种新型欺骗干扰呈现如下特点:第一,可以生成多个二维假目标,且生成的假目标散射特性与所掩护的目标完全相同,对于雷达来说难辨真伪;第二,干扰方法不依赖于对 ISAR 的信号侦察,不需测得目标与干扰机相对运动,只需通过合理选择干扰机位置及干扰参数就可控制群目标分布;第三,所生成的二维群目标有动态的姿态变化,与所掩护的目标相仿,难以被 ISAR 识别;第四,干扰机功率需求低,对于干扰机小型化有着十分重要的意义。因此,本文所提出的方法拓宽了间歇采样转发的应用领域,为二维群假目标生成提供了一种便于实现的可行途径,对于机载、弹载干扰机的研制及应用具有重要的指导意义。

参考文献 (References)

[1] Xu S K, Liu J H, Fu Y W, et al. A deception jamming method for ISAR based on sub-nyquist sampling technology [C]// ICSP2010 Proceedings, 2010: 2023-2026.

[2] Schleher D C. Electronic warfare in the information age [M]. MA: Artech House, Norwood, Massachusetts, 1999.

[3] 冯德军, 王雪松, 肖顺平, 等. 空间目标 ISAR 成像与识别对抗 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(1): 43-45. FENG Dejun, WANG Xuesong, XIAO Shunping, et al. Study on countermeasures against ISAR imaging and identification of space target [J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(1): 43-45. (in Chinese)

[4] 祝本玉, 薛磊, 毕大平. 一种有效的逆合成孔径雷达散射波干扰方法 [J]. 电波科学学报, 2011, 26(1): 193-198. ZHU Benyu, XUE Lei, BI Daping. An effective scatter-wave jamming way against ISAR [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(1): 193-198. (in Chinese)

[5] 毕大平, 吴少峰. 对逆合成孔径雷达的移频干扰技术研究 [J]. 电子对抗, 2011, 136(1): 8-12. BI Daping, WU Shaofeng. Study on the shift-frequency jamming to ISAR [J]. Electronic Warfare, 2011, 136(1): 8-12. (in Chinese)

[6] 白雪茹, 孙光才, 周峰, 等. 基于旋转角反射器的 ISAR 干扰新方法 [J]. 电波科学学报, 2008, 23(5): 867-872. BAI Xueru, SUN Guangcai, ZHOU Feng, et al. A novel ISAR jamming method based on rotating angular reflectors [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(5): 867-872. (in Chinese)

[7] Pace P E, Fouts D J, Ekestorm S, et al. Digital false-target image synthesizer for countering ISAR [J]. IEE Proceedings. Radar Sonar Navig, 2002, 149(5): 248-257.

[8] 李源, 刘建新, 陈惠连. 基于正弦调相的 ISAR 干扰方法 [J]. 信号处理, 2007, 23(1): 101-105. LI Yuan, LIU Jianxin, CHEN Huilian. A jamming method based to ISAR based on sinusoidal phase modulation [J]. Signal Processing, 2007, 23(1): 101-105. (in Chinese)

[9] 李源, 陈惠连. 基于图像合成的 ISAR 欺骗干扰研究 [J]. 现代雷达, 2007, 29(3): 56-62. LI Yuan, CHEN Huilian. Study on deception jamming against ISAR using image synthesis technology [J]. Modern Radar, 2007, 29(3): 56-62. (in Chinese)

[10] Wang X S, Liu J C, et al. Mathematic principles of interrupted-sampling repeater jamming [J]. Science in China, Series F: Information Sciences, 2007, 50(1): 113-123.

[11] Feng D J, Tao H M, Yang Y, et al. Jamming de-chirping radar using interrupted sampling repeater [J]. Science in China, Series F: Information Sciences, 2011, 54(10): 2138-2146.

[12] 肖顺平, 魏建功, 冯德军, 等. ISAR 成像包络对齐性能评估 [J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(3): 56-60. XIAO Shunping, WEI Jianguo, FENG Dejun, et al. Evaluation of range alignment methods in ISAR imaging [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(3): 56-60. (in Chinese)

[13] 张亚标, 朱振波, 汤子跃, 等. 双站逆合成孔径雷达成像理论研究 [J]. 电子与信息学报, 2006, 28(6): 969-972. ZHANG Yabiao, ZHU Zhenbo, TANG Ziyue, et al. Bistatic inverse synthetic aperture radar image formation [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2006, 28(6): 969-972. (in Chinese)